

Министерство по образованию и науке РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана»
Студенческое научно-техническое общество имени Н.Е. Жуковского
Научно-учебный комплекс
«Машиностроительные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кафедра «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана
ООО «КванторФорм»

СБОРНИК СТАТЕЙ

Всероссийской научно-технической конференции студентов

«Студенческая научная весна 2015:

Машиностроительные технологии»

7 – 10 апреля 2015 г.

г. Москва, 2015 г.

УДК 62

ББК 34

Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 7 – 10 апреля, 2015, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана / отв. ред. Ю.А.Гладков. – Москва: ООО «КванторФорм», 2015.

Представленные материалы ежегодной всероссийской научной студенческой конференции по машиностроительным технологиям (тезисы докладов и научные статьи) могут служить учебным материалом для дополнительной углубленной подготовки студентов. В материалах конференции отражены современные достижения профильных кафедр Российских ВУЗов в области машиностроения по 13 технологическим направлениям, в числе которых обработка металлов давлением, сварка, прокатка, технологии резания, литья, материаловедения, метрологии и другие.

Всероссийская конференция проводится с 2007 года и является традиционным ежегодным научно-техническим мероприятием для студентов факультета «Машиностроительные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также для студентов других Российских технических ВУЗов. Цель конференции – предоставить возможность рассказать о самостоятельно выполненных научно-исследовательских проектах, обменяться идеями и опытом, соотнести уровень собственных разработок с работами других студентов.

Ключевые слова: обработка резанием, технология машиностроения, метрология, литейные технологии, технологии обработки давлением, моделирование в QForm, технологии сварки, материаловедение, промышленный дизайн, технологии прокатки, электронные технологии, лазерные технологии, реновационные технологии

Редактор: Гладков Ю.А.
Дизайн, верстка: Кайбаров А.П., Рукавичко Е.А.,
Сайтов Р.Р., Сайимов А.Ш., Халикова А.Т.

Опубликовано 07.04.2015

Формат PDF

Оглавление

Состав оргкомитета	8
Порядок проведения конференции.....	10
Секция 1. Металлорежущие станки	11
Диагностика технического состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования. Выбор оптимального метода.....	12
Оценка использования мотор-шпинделей в приводах металлорежущих станков.....	20
Этапы развития точности станков	23
Пути развития и совершенствования электропривода металлорежущих станков	27
Анализ конструкций станин металлорежущих станков	30
Диагностика металлорежущих станков на основе движений формообразующих узлов	33
Усовершенствование станочных приспособлений для обработки длинномерных деталей типа тела вращений	36
Диагностика металлорежущих станков программными методами	43
Принцип «Лего-инжиниринг» в процессе проектирования специальных станков	47
Разработка типового расчета оптимизации координаты зоны резания токарных станков	51
Выбор металлорежущего станка при его замене на существующим производстве	59
Секция 3. Технология машиностроения.....	62
Исследование эффективности использования оборудования с ЧПУ в условиях многономенклатурного опытного производства	63
Экспериментальная установка для исследования процесса роботизированной сборки	71
Эффективность машиностроительного производства и анализ затрат	74
Выбор компоновки переналаживаемой линии для обработки валов-шестерен	79
Остаточные напряжения при производстве прутков	85
Моделирование технологических комплексов механосборочного производства	90
Разработка характеристик агрегатно-модульного манипулятора для сборки основных узлов автомобилей	95
Секция 4. Метрология и взаимозаменяемость	104
Вибродиагностика насосного агрегата XL 32-20-200 в процессе эксплуатации	105
Секция 5. Литейные технологии	114
Анализ и оптимизация действующей технологии получения отливки корпуса насоса и центробежных колес насоса КМ 50-32-125	115
Исследование влияния технологических параметров на получение трубных заготовок из высокопрочного чугуна	122

Исследование влияния конструкции литниковой системы на пористость отливок при литье под давлением	127
Секция 6. Технологии обработки давлением	130
Определение влияния радиусов матрицы и пуансона на процесс вытяжки	131
Разработка и исследование технологического процесса штамповки рабочего стола 3D принтера ProJet-1200	134
Поиск варианта технологического процесса штамповки детали типа «Патрубок»	145
Вытяжка деталей с наклонным фланцем	159
Моделирование процесса формовки-выпрямления листовых заготовок	167
Секция 8. Материаловедение в машиностроении	172
Лазерная наплавка износостойкого покрытия, полученного из порошков карбида вольфрама и никеля	173
Установка электромеханической обработки для поверхностного упрочнения деталей шасси самолета	178
Влияние термической обработки на структуру и свойства литейных сплавов на основе систем Al-Ca, Al-Ce и Al-La	183
Исследование свойств методом проволоки, полученной методом гальванического лужения с последующим волочением, совмещенным с контактным отжигом	189
Влияние жаростойкого ионно-плазменного покрытия на свойства жаропрочного никелевого сплава	197
Формирование заданного комплекса свойств из гранулируемого никелевого сплава ЭП741НП	205
Влияние обработки высококонцентрированными источниками энергии на структуру поверхности углеродистых сталей	213
Влияние режима изотермической закалки на твердость и структуру стали 30ХГСА	217
Высокопрочные конструкционные титановые сплавы и их применение в авиастроении	225
Исследование структуры и свойств композиционного материала системы алюминий-титан	233
Коррозионные испытания тонколистового сварного соединения из алюминиевого сплава АСВ-1	237
Вакуумная комбинированная химико-термическая обработка стали ВКС-10	243
Износостойкие покрытия, полученные методом ионно-плазменного напыления	249
Использование арамидных волокон для увеличения прочности углепластики при сдвиге вдоль	255
Возможные методы синтезирования порошка AlOn	259
Исследование структуры теплостойких сталей после теплой пластической деформации и последующей вакуумной цементации	267

Исследование структуры и свойств жаропрочного никелевого сплава, полученного методом селективного лазерного плавления	273
Разработка композиционного материала с использованием алюминиевой матрицы	279
Секция 9. Промышленный дизайн.....	285
Портативное защищенное навигационное устройство для военных потребителей	286
Механизмы Франца Рёло	288
Дизайн-исследование современного освещения	296
Конструкция современного модульного стеллажа	303
Секция 10. Оборудование и технологии	311
Математическое моделирование крутильных колебаний валопровода стана ДУО-КВАРТО 320 ХП	312
Развитие металлургического машиностроения в России	319
Обзор технологических решений и оборудования для производства сверхтонкой горячекатаной полосы	327
Прогнозирование усталостной долговечности вала шпинделя стана ДУО-КВАРТО 320 ХП	334
Исследование процессов вакуумирования и нагрева многослойных стальных пакетов для получения листовых материалов с ультрамелкозернистой структурой	340
Секция 11. Электронные технологии в машиностроении	346
Особенности процесса контактного экспонирования толстых слоев негативного фоторезиста	347
Способ металлизации керамических подложек	352
Обработка технологии металлизации керамических подложек	361
Использование дисульфида молибдена для улучшения характеристик твердых нанокompозитных пленок	366
Особенности исследования тонких пленок на опаловом подслое методами туннельной и атомно-силовой микроскопии	371
Сравнительный анализ последовательности технологического процесса металлизации методом магнетронного распыления подложек из стеклотекстолита FR4 для рельефных печатных плат	377
Технология формирования дискретных тонкопленочных покрытий методом лазерной обработки	381
Исследование влияния геометрических параметров отверстий в слоистых пластиках на процесс их металлизации методом магнетронного распыления	385
Анализ систем базирования и совмещения слоев при изготовлении печатных плат	392
Платформа для активной виброизоляции прецизионного оборудования	406
Планерные оптические волноводы в электронике. Оценка разрешающей способности фотополимера EPOCORE	416

Монтаж и запуск жидкофазного магнетрона НМСА-50 на установке МВТУ-11-1	423
Монтаж и запуск жидкофазного магнетрона НМСА-50 на установке МВТУ-11-1	428
Отработка режимов предварительной очистки подложек по критерию угла	437
Отработка технологии формирования бездефектных тонких пленок никеля на стекле	443
Исследование точности магнитореологического привода	448
Анализ возможностей применения кластерных ионов для уменьшения шероховатости поверхности	457
Трибологические наноструктурные покрытия, формируемые методом распыления композитных мишеней	462
Применение тонких пленок дисульфидов тугоплавких металлов в электронной технике	468
Уменьшение шероховатости стеклянных подложек для светофильтров методами ионного травления	475
Электролиты для гальванического заполнения 3D-микрорезов	480
Перспективные технологии изготовления многослойных коммутационных плат	487
Секция 12. Лазерные технологии в машиностроении	493
Исследование перемешивания присадочного материала в зависимости от плотности лазерного излучения при нанесении высокопрочных износостойких покрытий	494
Создание металлизированной поверхности для изготовления тонкопленочных термоэлектрических модулей методом импульсного лазерного осаждения	498
Использование аддитивных технологий для получения деталей машиностроения	507
Анализ влияния технологических параметров процесса импульсного лазерного осаждения на физико-морфологические свойства тонких пленок	513
Анализ применения покрытий из кобальтовых сплавов в различных областях машиностроения, полученных методом лазерной наплавки	521
Секция 13. Реновационные технологии в машиностроении	528
Восстановление распределительного вала двигателя семейства ЯМЗ	529
Восстановление маховика автобуса «Икарус» электродуговой наплавкой с применением ферромагнитной шихты	542
Восстановление полуосей ступеней эскалатора	550
Внедрение роботизированных средств управления ими в современном машиностроении Российской Федерации	556
Устранение локальных дефектов гильз цилиндров дизельных двигателей методом электроискровой обработки	559
Технологии восстановления и упрочнения долот сеялки PRIMERA DMC 9000 фирмы AMAZONE	562

**Всероссийская научно-техническая конференция студентов
«Студенческая научная весна 2015:
Машиностроительные технологии»
7-10 апреля 2015 года**

Организаторы:

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Ректор Александров Анатолий Александрович

Студенческое научно-техническое общество им. Н.Е. Жуковского
Председатель Шевчун Владимир Николаевич

Научно-учебный комплекс «Машиностроительные технологии»
Руководитель Колесников Александр Григорьевич

Кафедра «Технологии обработки давлением» (МТ-6)
Заведующий каф. МТ-6 Евсюков Сергей Александрович

ООО «КванторФорм»
Генеральный директор Стебунов Сергей Александрович

Контактная информация конференции:

Сайт: www.studvesna.ru

E-mail: stud-vesna@yandex.ru

**Состав оргкомитета
Всероссийской научно-технической конференции студентов
«Студенческая научная весна 2015: Машиностроительные технологии»**

Председатель:

Колесников Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор, руководитель научно-учебного комплекса «Машиностроительные технологии»

Научный комитет

Евсюков Сергей Александрович председатель научного комитета, зав. каф. МТ-6, д.т.н., проф.

Стебунов Сергей Александрович сопредседатель научного комитета, директор ООО «КванторФорм», к.т.н.

Секция 1. Металлорежущие станки и оборудование

Утенков Владимир Михайлович зав. каф. МТ-1, д.т.н., проф.

Додонов Владимир Владимирович к.т.н., доц. МТ-1

Секция 2. Инструментальная техника и технологии

Древаль Алексей Евгеньевич зав. каф. МТ-2, д.т.н., проф.

Литвиненко Анатолий Васильевич к.т.н., доц. МТ-2

Секция 3. Технологии машиностроения

Васильев Александр Сергеевич зав. каф. МТ-3, д.т.н., проф.

Заставный Евгений Александрович к.т.н., доц. МТ-3

Секция 4. Метрология и взаимозаменяемость

Пронякин Владимир Ильич зав. каф. МТ-4, д.т.н., проф.

Комшин Александр Сергеевич к.т.н., доц. МТ-4

Секция 5. Литейные технологии

Семенов Вячеслав Иванович зав. каф. МТ-5, к.т.н., доц.

Савохина Ольга Михайловна ассистент МТ-5

Секция 6. Оборудование и технологии обработки давлением

Белокуров Олег Александрович доц. каф. МТ-6, к.т.н.

Алленов Максим Геннадьевич ассистент каф. МТ-6

Секция 7. Технологии сварки и диагностики

Коновалов Алексей Викторович зам. зав. каф. МТ-7, д.т.н., проф.

Якушин Борис Федорович проф. каф. МТ-7, д.т.н.

Секция 8. Материаловедение в машиностроении

Плохих Андрей Иванович доц. каф. МТ-8, к.т.н.

Шевченко Светлана Юрьевна доц. каф. МТ-8, к.т.н.

Секция 9. Промышленный дизайн

Терехова Наталия Юрьевна зам. зав. каф. МТ-9, к.т.н., доц.

Сафин Дмитрий Юсупович ст. преподаватель каф. МТ-9

Секция 10. Оборудование и технологии прокатки

Семенов Иван Евгеньевич проф. каф. МТ-10, д.т.н.

Шинкарев Александр Сергеевич ассистент МТ-10

Секция 11. Электронные технологии в машиностроении

Панфилов Юрий Васильевич зав. каф. МТ-11, д.т.н., проф.

Бычков Сергей Павлович ассистент МТ-11

Секция 12. Лазерные технологии в машиностроении

Григорьянц Александр Григорьевич зав. каф. МТ-12, д.т.н., проф.

Богданов Александр Владимирович доц. каф. МТ-12, к.т.н.

Секция 13. Реновационные технологии

Ступников Владимир Петрович зав. каф. МТ-13, д.т.н., проф.

Козлов Анатолий Владимирович доц. каф. МТ-13, к.т.н.

Организационный комитет

Гладков Юрий Анатольевич председатель организационного комитета, к.т.н.,
доц. МТ-6

Комшин Александр Сергеевич сопредседатель организационного комитета –
технический секретарь конференции, к.т.н.,
доц. МТ-4

Резвых Руслан Викторович специалист ИТ, разработка сайта, выпускник каф. МТ-6,
инженер ООО "КванторФорм"

Панова Ирина Андреевна сбор материалов конференции и переписка с
участниками, выпускница каф. МТ-6, ранее
председатель СНТО им. Н.Е. Жуковского факультета
МТ

Анцифиров Алексей
Анатольевич к.т.н., доц. МТ-6

Аникина Валерия Сергеевна сбор материалов конференции и переписка с
участниками, студентка группы МТ6-82

Тумакова Екатерина
Владимировна аспирант, ассистент каф МТ-4

Сырицкий Антони Борисович ассистент каф МТ-4

Волонтеры конференции:

Зудина Ольга студентка группы РК9-101

Кривенко Дмитрий, Смирнов
Андрей составление программы конференции, студенты группы
МТ6-61

Рукавичко Е.А., Халикова
А.Т., Кайбаров А.П., Сайтов Р.Р.,
Сайимов А.Ш. подготовка сборника тезисов и сборника статей
конференции, студенты группы МТ6-81

Порядок проведения
Всероссийской научно-технической конференции студентов
«Студенческая научная весна 2015: Машиностроительные технологии»

7 апреля 2015г., вторник

Заезд и поселение иногородних участников конференции

8 апреля 2015г., среда

с 9-00 до 09-45	Регистрация участников конференции Вручение свидетельств участника конференции	Главный учебный корпус (ГУК), ауд.213 (Читальный зал старших курсов)
с 10-00 до 10-35	Торжественное открытие конференции	
	Заседание научных секций	
с 12-00 до 16-00	Секция 1. Металлорежущие станки и оборудование	ГУК, каф. МТ-1 ауд. 114
с 11-00 до 15-00	Секция 2. Инструментальная техника и технологии	ГУК, каф. МТ-2 (Инструментальный кабинет)
с 11-00 до 15-00	Секция 3. Технологии машиностроения	ГУК, каф. МТ-3 ауд.299а
с 14-00 до 17-00	Секция 4. Метрология и взаимозаменяемость	Корпус МТ, каф. МТ-4 ауд. 218
с 13-00 до 15-00	Секция 5. Литейные технологии	Каф. МТ-5, ком. 20
	Секция 6. Оборудование и технологии обработки давлением.	
с 11-00 до 16-00	Подсекция 6-1. Моделирование и исследование технологических процессов ОД	ГУК, ауд.229 "Преподавательский читальный зал"
с 11-00 до 16-00	Подсекция 6-2. Проектирование прогрессивных технологических процессов и оборудования ОД	Здание каф. МТ-6, Учебно-методический кабинет
	Секция 7. Технологии сварки и диагностики	
с 11-00 до 16-00	Подсекция 7.1. Сварка	Каф. МТ-7, ауд. 209 (Зал заседаний)
с 11-00 до 16-00	Подсекция 7.2. Диагностика	Каф. МТ-7, ауд. 217
	Секция 8. Материаловедение в машиностроении.	
с 14-00 до 18-00	Подсекция 8.1. Термическая обработка сталей	ГУК, каф. МТ-8, ауд.3
с 14-00 до 18-00	Подсекция 8.2. Термическая обработка цветных сплавов	ГУК, каф. МТ-8, ауд.15
с 11-30 до 16-00	Подсекция 8.3. Композиционные материалы	Корпус Энергомашиностроения, ауд. НОЦ "НМКН"
с 14-00 до 18-00	Подсекция 8.4. Химико-термическая обработка и покрытия	ГУК, каф. МТ-8, ауд.5
с 17-30 до 21-00	Секция 9. Промышленный дизайн	ГУК, ауд.208
с 11-15 до 15-00	Секция 10. Оборудование и технологии прокатки	ГУК, каф. МТ-10 (Конференц-зал)
	Секция 11. Электронные технологии в машиностроении.	
с 14-00 до 17-00	Подсекция 11.1. Электронные технологии в машиностроении	Корпус МТ, каф.МТ-11, ауд. 313
с 16-00 до 19-00	Подсекция 11.2. Микро- и нанотехнологии	Корпус МТ, каф.МТ-11, ауд. 304
с 14-00 до 17-00	Подсекция 11.3. Элионные технологии	
с 14-00 до 17-00	Секция 12. Лазерные технологии в машиностроении	Каф. МТ-12
с 15-00 до 19-00	Секция 13. Реновационные технологии в машиностроении	Корпус МТ, каф. МТ-13 ауд. 115

9 апреля 2015г. четверг

с 10-00 до 14-00	Секция 6 (продолжение). Методический семинар компании КванторФорм по вопросам моделирования процессов пластической деформации.	ГУК, ауд. 229 "Преподавательский читальный зал"
с 15-30 до 16-30	Торжественное закрытие конференции Вручение дипломов и призов за лучшие работы.	ГУК, ауд.213 (Читальный зал старших курсов)

10 апреля 2015г. пятница

Отъезд иногородних участников конференции

Секция I

Металлорежущие станки и оборудование

Председатель:

Утенков Владимир Михайлович

доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой МТ-1

Ученый секретарь:

Додонов Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-1

УДК 621.9

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ И МЕХАНИЗМОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА

Алексей Андреевич Алексеев

Аспирант 3 года

*кафедра «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты» имени С.С. Силина
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева*

Научный руководитель: Д.И. Волков

доктор технических наук, профессор кафедры «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты» имени С.С. Силина

В статье приведен анализ основных методов диагностики технического состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования. Исследован метод определения технического состояния по анализу вибросигнала.

Металлорежущее оборудование составляет большую часть производственного парка предприятий авиадвигателестроительной отрасли. Обеспечение работоспособности данного оборудования является важнейшей задачей ремонтной службы предприятия. Для обеспечения рационального использования средств на приобретение запасных частей и материалов, а также осуществления планирования ремонта возникает острая необходимость в определении фактического состояния узлов и механизмов металлорежущих станков.

Правильная организация и оптимальный выбор методов и средств диагностирования технического состояния металлорежущего оборудования в совокупности со своевременным принятием профилактических мер позволяет существенно снизить затраты на технический обслуживание и ремонт.

Техническая диагностика - установление и изучение признаков, характеризующих наличие дефектов в машинах, устройствах, узлах и т. п., для предсказания возможных отклонений в режимах их работы и для разработки методов и средств их обнаружения [1].

Целью технического диагностирования изделий является поддержание установленного уровня надежности, обеспечение требований безопасности и эффективности использования изделий. Техническое диагностирование изделий должно быть направлено на решение следующих взаимосвязанных задач [2]:

- определение вида технического состояния;
- поиск места отказа или неисправностей;
- прогнозирование технического состояния.

Диагностирование позволяет получить объективную информацию о техническом состоянии каждой единицы оборудования, на основе которой можно обеспечить оптимальность технического обслуживания и ремонта. Диагностирование оборудования включает в себя следующие операции: сбор информации о состоянии объекта диагностики, прием информации и ее обработка, передача результатов обработанной информации, принятие решения о выполнении последующих операций или о дальнейшем использовании оборудования на основании результатов оценки.

Анализ статистических данных по поломкам металлорежущего оборудования одного из предприятий за период два года показал, что распределение неисправностей в процентном соотношении выглядит следующим образом:

- 43% - неисправность гидро- и пневмосистем станка;
- 21% - неисправность механической части станка;
- 18% - неисправность системы управления и электропитания;

11% - прочие незначительные неисправности;

7% - неисправность систем принудительного охлаждения и кондиционирования.

Стабильная работа гидро- и пневмосистемы станка является одним из важнейших факторов влияющих на долговечность и безотказность в работе всех узлов оборудования. Наличие достаточной смазки подвижных частей станка позволяет избежать преждевременного износа трущихся поверхностей и, как следствие, предотвращает преждевременный выход из строя оборудования. Течи жидкости и неисправность гидронасоса приводят к чрезмерному или недостаточному их расходу и пульсациям при работе механизмов. Несвоевременная замена фильтров влечет за собой загрязнение всей гидравлической системы, уменьшению потока и поломке оборудования.

Таким образом, большую часть неисправностей составляют первые три группы. С целью определения возможных причин возникновения поломок выполнен более детальный анализ этих групп, результаты которого показали, что большая часть всех неисправностей возникла по причине несвоевременного или проведенного не в полном объеме технического обслуживания, а также отсутствие технической диагностики.

Если проблемы проведения своевременного технического обслуживания являются в большей степени организационного плана, то вопросы диагностики динамически нагруженных узлов и механизмов станка требует детального изучения.

Существует множество методов и средств диагностирования технического состояния механической части станка. Применение всех методов в комплексе потребовало бы больших финансовых затрат на приобретение технических средств и значительное количество людского ресурса, обладающего знаниями в различных областях науки. В связи с этим требуется провести анализ основных методов технической диагностики применимо к динамически нагруженным узлам станка, содержащим, например, такие элементы как подшипники, шарико-винтовые пары, шестерни.

Рассмотрим и проанализируем основные методы диагностирования оборудования:

- *предварительная оценка* технического состояния станка в результате слухового и зрительного восприятия оператором-станочником. В неисправных или имеющих повышенный износ узлах и механизмах станка появляются шумы, вибрации и повышение температуры по которым судят о наличии дефекта;

- *тепловизионное диагностирование*. Тепловизионная диагностика и тепловой контроль представляет собой высокотехнологичную область прикладных исследований, объединяющую достижения не только в создании аппаратуры (тепловизоров), но и в теории теплопередачи, информационных и компьютерных технологиях. Основными преимуществами тепловизионной диагностики являются: проведение тепловизионного контроля без специальных условий и без вывода объекта контроля из эксплуатации, безконтактность, контроль объектов любых форм и размеров, высокая производительность контроля, высокая скорость обработки результатов. Однако данные, получаемые по результатам тепловизионной диагностики металлорежущих станков, например, температура на поверхности того или иного узла, не дает достаточной информации о фактическом состоянии его механизмов;

- *акустическое диагностирование*. Применение технических стетоскопов, функционирующих в звуковом диапазоне частот, позволяет локализовать дефектный узел машины с повышенными стуками и шумами;

- *трибодиагностика*, является методом диагностирования состояния трущихся деталей на основе анализа продуктов износа в смазочном масле. При анализе проб масла определяют концентрацию в нем составляющего элемента изнашиваемого материала, по величине которой оценивают усредненный износ соответствующей детали. Недостатком данного метода является определение суммарного износа деталей, изготовленных из одних и тех же материалов;

- *метод поверхностной активации*. Он основан на измерении интенсивности излучения радионуклидной метки, установленной на контролируемом участке поверхности объекта. В

результате уноса радиоактивного вещества смазочным маслом в оборудовании или транспортируемой средой в трубопроводе, ее излучение уменьшается;

- *измерение геометрических параметров.* Проверка основных геометрических параметров оборудования с целью выявления отклонений от допустимых значений для дальнейшего определения причин данных отклонений. Для станков с ЧПУ применяется специальные современные технические средства проверки геометрических параметров, таких как: проверка согласованности работы приводов, контроль круговой траектории, определение люфтов по каждой координате, неперпендикулярность осей, непараллельность по каждой оси и другие;

- *вибрационное диагностирование.* Метод основан на анализе вибрационного сигнала, получаемого в результате считывания вибрации с поверхности узла и преобразования полученного сигнала с помощью специальных технических средств. Считывание сигнала производится при помощи датчика-акселерометра с последующим сбором и расшифровкой в виброанализаторе. При этом любой дефект какого-либо узла характеризуется индивидуальной вибрационной картиной. Из множества параметров, характеризующих вибрационный процесс, выделяют только те, которые прямо или косвенно характеризуют состояние объекта. По этим параметрам формулируют информативную систему признаков, используемых при диагностировании. Метод позволяет определить различные параметры механического износа узлов и механизмов станка. Определяются дефекты подшипников, в том числе износ наружного и внутреннего кольца, перекос кольца, износ тел качения, определяется износ шестерен, перекос валов, износ шарико-винтовой пары и другие.

Анализируя рассмотренные выше методы диагностики можно сделать вывод, что для определения состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования наиболее информативным и точным является вибрационная диагностика.

Вибрационная диагностика — метод диагностирования технических систем и оборудования, основанный на анализе параметров вибрации, либо создаваемой работающим оборудованием, либо являющейся вторичной вибрацией, обусловленной структурой исследуемого объекта [3].

Вибрационная диагностика, как и другие методы технической диагностики, решает задачи поиска неисправностей и оценки технического состояния исследуемого объекта.

Основными преимуществами вибрационной диагностики являются:

- метод позволяет определять наличие скрытых дефектов;
- диагностика, считывание вибросигнала, как правило, не требует разборки оборудования;
- относительно небольшое время считывания необходимого спектра вибросигнала;
- возможность обнаружения неисправностей на этапе их зарождения;
- снижение ожидаемого риска возникновения аварийной ситуации при эксплуатации оборудования.

Вибрационные характеристики являются наиболее информативным инструментом для идентификации технического состояния узлов и механизмов оборудования. В процессе работы станка возникает широкий спектр колебаний, природа которых имеет как стационарный, так и нестационарный характер, могут действовать как вынужденные колебания, так и автоколебания. Автоколебания различаются при резании и при работе на холостых ходах, т.е. при его установившихся перемещениях и при функционировании без резания. В процессе обработки динамические составляющие сил резания в большинстве случаев имеют нелинейный характер, определяемый именно процессом резания. В свою очередь для идентификации состояния элементов станка более всего подходит режим его функционирования на холостом ходу, при котором вибрационные характеристики в целом определяются работой его деталей и узлов: подшипниками, шестеренными, ременными передачами, шариково-винтовыми парами, приводными механизмами. При работе на холостом ходу станка в ряде случаев наблюдается незначительный уровень вибрации, что обуславливает применение высокочувствительной

аппаратуры, позволяющей фиксировать необходимые частотные характеристики и позволяющей суммировать измеряемые характеристики с целью расчета средних значений, которые наиболее полно характеризуют состояние исследуемых объектов.

Колебания элементов динамически нагруженных узлов станка являются основными источниками вибраций, возникающими при работе, причем их частотные составляющие и величины амплитуд вибраций определяются как дефектами отдельных элементов, установленных на валах, так и погрешностями сборки и эксплуатации. Отличительной особенностью вибраций вращающихся элементов и деталей является то, что наибольшие амплитуды наблюдаются в поперечном направлении, а вибрационный сигнал хорошо передается по корпусным деталям. Таким образом, при установке датчика на корпусе узла можно получить исходную информацию о вибрационном состоянии параметров каждого подшипника и параметров шариково-винтовых пар. Но следует учитывать, что вибрационный сигнал значительно затухает при передаче его через большое количество сопряжений между деталями, особенно корпусными.

При работе оборудования в подшипниках генерируются вибрации в широком частотном диапазоне. Появление вибраций в подшипниках, обусловлено их конструктивными особенностями. Составляющие элементы, совершающие сложное кинематическое движение с различными угловыми скоростями, приводят к возникновению спектра вибраций в диапазоне от низких до высоких частот. Также появлению вибраций способствуют неточности деталей подшипников, образовавшиеся при их изготовлении. К ним относятся разностенность наружного и внутреннего кольца, некруглость и шероховатость тел качения и дорожек колец, погрешности, вызванные дефектами сборки узлов, в том числе перекося наружных и внутренних колец, дисбалансом вращающихся валов.

В процессе эксплуатации подшипников возникают следующие дефекты: износ беговых дорожек колец, образование на них задиров, износ тел качения и сепаратора, некруглость тел вращения, образование трещин в сепараторах. Зарождение и развитие каждого дефекта характеризуется соответствующими частотами и изменениями амплитуд колебаний.

Подшипник качения является самым распространенным и наиболее уязвимым элементом основных узлов и механизмов металлорежущего станка. Подшипники осуществляют пространственную фиксацию и воспринимают основную часть статических и динамических усилий, возникающих в механизме.

Вибросигнал несет в себе большое количество информации о состоянии как самого подшипника, так и его элементов, но в первоначальном виде вибросигнал не позволяет определить степень развития дефекта. Для получения более полной картины о состоянии подшипника используют различные методы и средства анализа и преобразования вибросигнала.

Рассмотрим основные методы оценки технического состояния подшипников качения, основанные на анализе вибрационного сигнала:

1) *диагностика по спектру вибросигнала или метод прямого спектра.*

Метод основан на анализе вибрационного сигнала с точки зрения периодичности появления амплитудных всплесков (рис. 1). Вибрационный сигнал анализируется узкополосным спектральным анализатором и по частотному составу спектра можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника.

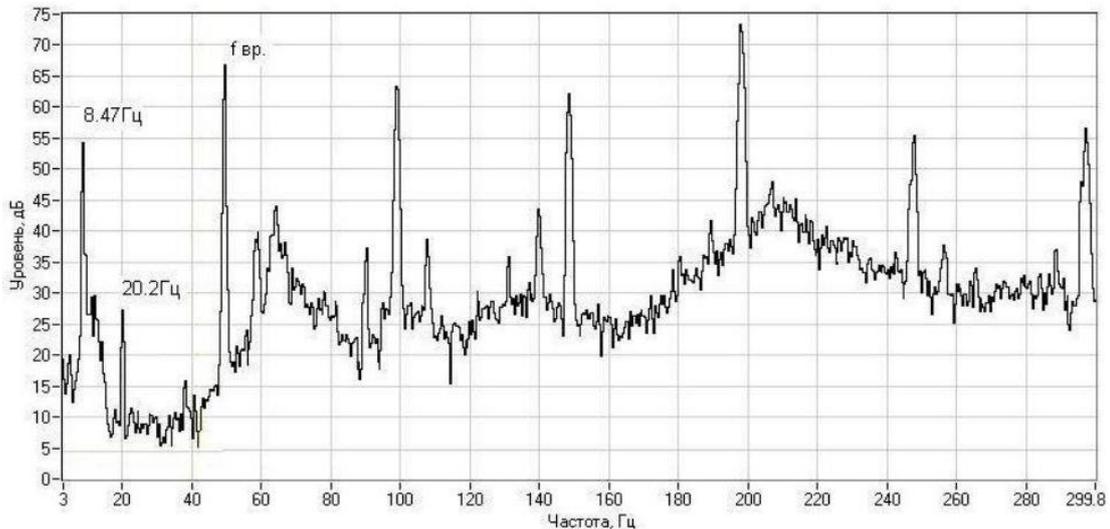


Рис. 1. Прямой спектр вибрации

Амплитудные всплески в вибросигнале следуют не хаотично, а с вполне определённой периодичностью или частотой. Причём дефекту на каждом из элементов подшипника будь то тела качения, дорожки или сепаратор соответствуют свои частоты, которые однозначно просчитываются в зависимости от кинематики подшипника и скорости его вращения. Наличие той или иной дискретной составляющей в спектре сигнала говорит о возникновении соответствующего дефекта подшипника, а амплитуда этой составляющей – о глубине дефекта. Это несколько упрощённый подход, поскольку многие дефекты в спектре проявляются в виде не одной частотной составляющей, а нескольких.

Достоинства метода:

- достаточно высокая помехозащищённость (маловероятно наличие в механизме источников, создающих вибрации на тех же точно частотах, что и дефекты подшипника);
- высокая информативность метода. Метод даёт возможность получить дифференцированную оценку состояния подшипника отдельно по каждому его кинематическому узлу, поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.

Недостатки метода:

- метод дорогостоящий, любой самый простой узкополосный спектрального анализатора стоит несоизмеримо дороже любого виброметра;
- низкая чувствительность к зарождающимся и слабым дефектам. Это связано с тем, что подшипник в большинстве механизмов является очень маломощным источником вибрации. Небольшой скол на шарике или дорожке не в состоянии повлиять на механизм так, чтобы мы увидели эту частотную составляющую в спектре вибрации. И только при достаточно сильных дефектах амплитуды этих частотных составляющих начинают заметно выделяться над общей шумовой частью спектра.

2) диагностика по спектру огибающей вибросигнала.

Высокочастотная, шумовая часть сигнала меняет свою амплитуду во времени, т.е. она модулируется неким более низкочастотным сигналом. Именно в этом модулирующем сигнале содержится и информация о состоянии подшипника. Выделение и обработка этой информации и составляют основу этого метода. Установлено, что наилучшие результаты этот метод даёт в том случае, если анализировать модуляцию не широкополосного сигнала, получаемого от акселерометра, а предварительно осуществить полосовую фильтрацию вибросигнала в диапазоне примерно от 4 до 20 кГц и анализировать модуляцию этого сигнала. Для этого отфильтрованный сигнал детектируется, т.е. выделяется модулирующий сигнал, который подаётся на узкополосный спектроанализатор и мы получаем спектр интересующего нас модулирующего сигнала или спектр огибающей. Что и дало название методу. Метод схематически представлен на рисунке 2

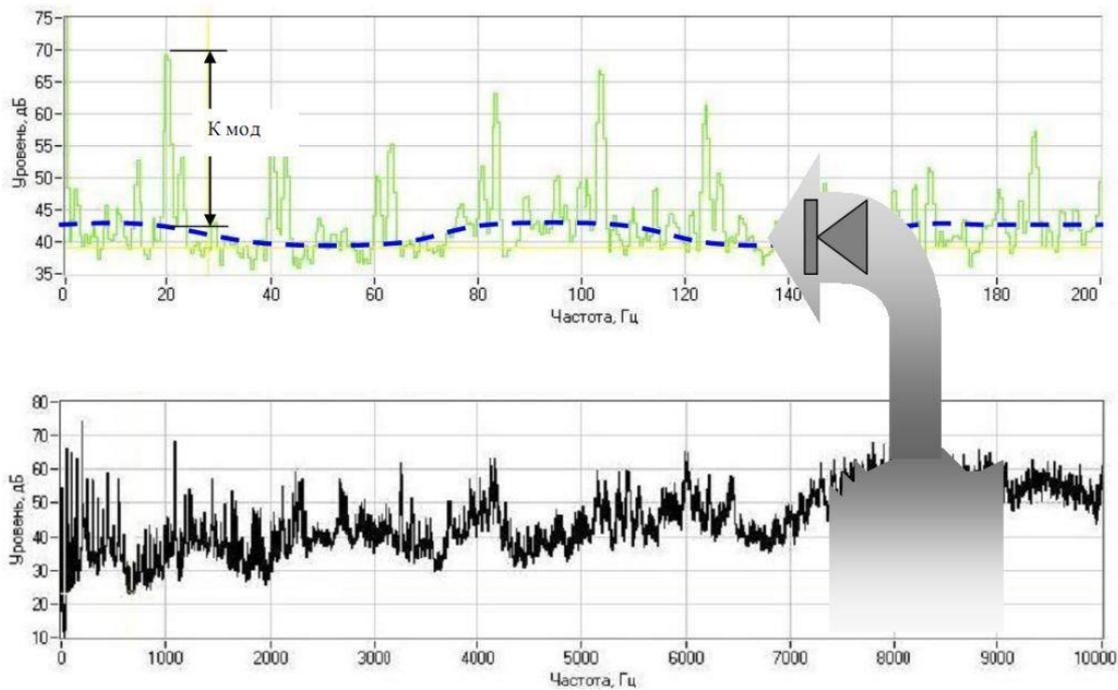


Рис. 2. Метод спектра огибающей

Небольшие дефекты подшипника не в состоянии вызвать заметные вибрации в области низких и средних частот, генерируемых подшипником. В тоже время для модуляции высокочастотных вибрационных шумов энергии возникающих ударов оказывается вполне достаточно, т.е. метод обладает очень высокой чувствительностью. Сам спектр огибающей имеет всегда очень характерный, специфический вид. При отсутствии дефектов он представляет собой почти горизонтальную, слегка волнистую линию. При появлении дефектов, над уровнем этой достаточно гладкой линии сплошного фона начинают возвышаться дискретные составляющие, частоты которых однозначно просчитываются по кинематике и оборотам подшипника. Частотный состав спектра огибающей позволяет идентифицировать наличие дефектов, а превышение соответствующих составляющих над фоном однозначно характеризует глубину каждого дефекта.

Достоинства метода: высокая чувствительность, информативность, помехозащищенность.

Недостатки метода: высокая стоимость, определенная сложность реализации.

Как правило, алгоритм обработки и анализа реализуется с использованием компьютерной техники.

3) метод ПИК-фактора.

Для контроля технического состояния подшипников по этому методу необходимо иметь простой виброметр, позволяющий измерять два параметра вибросигнала:

- среднеквадратичное значение уровня (СКЗ) вибрации, т.е. энергии вибрации;
- пиковую амплитуду (ПИК) вибрации.

Отношение двух этих параметров ПИК/СКЗ называется ПИК-фактор. Осциллограмма вибросигнала нового хорошо смазанного подшипника имеет стационарный двухполярный сигнал шумового характера, симметричный относительно временной оси.

С течением времени, по мере появления дефектов на кинематических узлах подшипника, в вибросигнале начнут появляться отдельные, короткие амплитудные пики, соответствующие моментам соударения дефектов. В дальнейшем, с развитием дефекта, сначала увеличиваются амплитуды пиков, потом постепенно увеличивается и их количество. Появившись вначале, например, на одном из шариков, он создаёт забоину на кольце, с него она переносится на другой шарик, дефекты шариков начинают вырабатывать сепаратор и т.д. до полного разрушения. Зависимости значений ПИК и СКЗ представляют собой монотонные,

неубывающие функции одинакового характера, но смещённые друг относительно друга во времени. На рисунке 3 представлены графики показывающие зависимости ПИК, СКЗ и ПИК-фактора по мере развития дефекта.

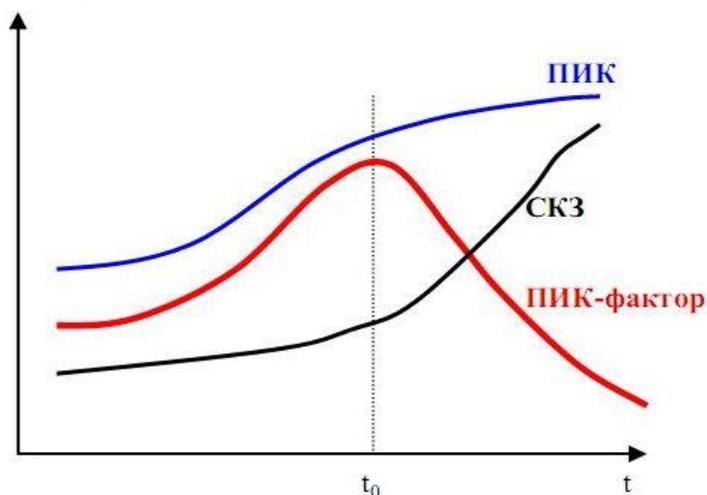


Рис. 3. Метод ПИК-фактора

Сначала, по мере появления и развития дефекта, нарастает функция ПИК, а СКЗ меняется очень мало, поскольку отдельные, очень короткие амплитудные пики практически не меняют энергетические характеристики сигнала. В дальнейшем, по мере увеличения и количества пиков, начинает увеличиваться энергия сигнала, возрастает СКЗ вибрации.

Достоинства метода: низкая стоимость, простота реализации.

Недостатки метода: слабая помехозащищенность, необходимость проводить многократные измерения.

4) Метод ударных импульсов.

Метод основан на измерении и регистрации механических ударных волн, вызванных столкновением двух тел. Ускорение частиц материала в точке удара вызывает волну сжатия, которая распределяется в виде ультразвуковых колебаний. Ускорение частиц материала в начальной фазе удара зависит только от скорости столкновения и не зависит от соотношения размеров тел.

Период времени мал, и заметной деформации не происходит. Величина фронта волны является мерой скорости столкновения двух тел. Во второй фазе удара поверхности двух тел деформируются, энергия движения отклонит тело и вызовет в нем колебания. Для измерения ударных импульсов используется пьезоэлектрический датчик, на который не оказывает влияние фон вибрации и шум.

Вызванная механическим ударом фронтальная волна сжатия возбуждает затухающие колебания в датчике (преобразователе). Пиковое значение амплитуды этого затухающего колебания прямо пропорционально скорости удара. Поскольку затухающий переходный процесс очень хорошо определяется и имеет постоянную величину затухания, его можно отфильтровать от других сигналов, т.е. от сигналов вибрации.

Изменение и анализ затухающего переходного процесса — основа метода ударных импульсов. Наблюдаемый процесс аналогичен тому, как отзывается на удары камертон. Как бы вы по нему ни ударили — он звенит на своей собственной частоте. Так и подшипниковые узлы от соударения дефектов «звенят» на своей частоте.

Частота эта практически всегда лежит в диапазоне 28–32 кГц, и, в отличие от камертона, эти колебания очень быстро затухают, поэтому на осциллограммах они выглядят практически как импульсы, что и дало название методу. Результаты измерений очень легко нормировать по скорости соударения, зная геометрию подшипника и его обороты.

Амплитуды ударных импульсов однозначно связаны со скоростью соударения дефектов и глубиной дефектов. Поэтому по амплитудам ударных импульсов можно достоверно диагностировать наличие и глубину дефектов.

Достоинства метода: высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность. Метод прост и доступен в реализации, существуют простые, портативные приборы.

Недостатки метода: существует одно ограничение, связанное с конструктивным исполнением механизма. Поскольку речь идет об измерении ультразвуковых волн колебаний, которые очень сильно затухают на границах разъемных соединений, для точности измерений необходимо, чтобы между наружным кольцом подшипника и местом установки датчика существовал сплошной массив металла. В большинстве случаев это не вызывает проблем. Метод широко используется в среде профессионалов, прост и доступен персоналу, обслуживающему оборудование.

Вибрация, создаваемая подшипником качения, характеризуется следующими основными частотами, связанными с элементами подшипников [4]:

- частота вращения сепаратора относительно наружного кольца:

$$f_c = \frac{1}{2} f_{\dot{a}\dot{\delta}} \cdot \left\{ 1 - \frac{d_{\dot{\delta}\dot{e}}}{d_c \cdot \cos(\alpha)} \right\} \quad (1)$$

где f_{gp} - частота вращения подвижного кольца относительно неподвижного; d_{mk} - диаметр тела качения; α - угол контакта тел и дорожек качения; $d_c = 1/2(d_n - d_e)$ - диаметр сепаратора, d_n - диаметр наружного кольца, d_e - диаметр внутреннего кольца.

- частота перекачивания тел качения по наружному кольцу:

$$f_i = \frac{1}{2} f_{\dot{a}\dot{\delta}} \cdot \left\{ 1 - \frac{d_{\dot{\delta}\dot{e}}}{d_c \cdot \cos(\alpha)} \right\} \cdot z = f_c \cdot z \quad (2)$$

где z - число тел качения.

- частота перекачивания тел качения по внутреннему кольцу:

$$f_{\dot{a}} = \frac{1}{2} f_{\dot{a}\dot{\delta}} \cdot \left\{ 1 + \frac{d_{\dot{\delta}\dot{e}}}{d_c \cdot \cos(\alpha)} \right\} \cdot z = (f_{\dot{a}\dot{\delta}} - f_{\dot{n}}) \cdot z \quad (3)$$

- частота вращения тел качения относительно поверхности колец:

$$f_{\dot{\delta}\dot{e}} = \frac{\frac{1}{2} f_{\dot{a}\dot{\delta}} \cdot d_c}{d_{\dot{\delta}\dot{e}} \cdot \left\{ 1 - \frac{d_{\dot{\delta}\dot{e}}^2}{d_c^2 \cdot \cos^2(\alpha)} \right\}} \quad (4)$$

Получив частоты вращения основных элементов подшипника можно проанализировать и «отфильтровать» спектр вибрационного сигнала, определив тем самым пиковые амплитуды колебаний этих элементов, соответствующие моментам соударения в местах дефектов. По полученным данным проводится исследование характера дефекта и степени его развития, позволяющее также выявить зарождающиеся дефекты.

Техническое диагностирование является объективным методом оценки технического состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования с целью определения наличия или отсутствия дефектов, степени их развития и сроков проведения ремонта, в том числе прогнозирования технического состояния оборудования. Правильный выбор методов и средств технической диагностики позволит значительно сократить потери времени и денежных средств.

Литература

1. <http://www.slovoedia.com/2/210/267143.html>
2. ГОСТ 27518-87 Диагностирование изделий. Общие требования

3. https://ru.wikipedia.org/wiki/Вибрационная_диагностика

4. Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А. Неразрушаемый контроль: Справочник. – М., «Машиностроение». - 2005 г. - Т. 7 - Книга 2 - 829 с.

УДК 621.941

ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОТОР-ШПИНДЕЛЕЙ В ПРИВОДАХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Сергей Олегович Востриков

Студент 4 курса

кафедра «Металлорежущие станки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Г. Ягопольский

старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»

Приводы современных технологических машин (металлорежущих станков, кузнечно-прессового оборудования, прокатных станов, литьевых машин и др.) – это сложные электронно-механические устройства для передачи движения от источника (электродвигателя) к рабочим органам станка.

Все большее применение в главных приводах металлорежущих станков имеют мотор-шпиндели. Применение мотор-шпинделей обуславливается их соответствием всем требованиям к шпинделям технологических машин: точности оборотов (1-2% от номинальных), биению шпинделя (менее 1 мкм) и высокой жесткости шпинделя. Шпиндель же является основной частью металлорежущего станка и существенно влияет на показатели точности и производительности - оценим использование мотор-шпинделей.

Мотор-шпиндель - это шпиндельный узел металлорежущего станка, в который встроен электродвигатель, а вал двигателя является шпинделем станка.

На рис.1 изображен общий вид мотор-шпинделя.

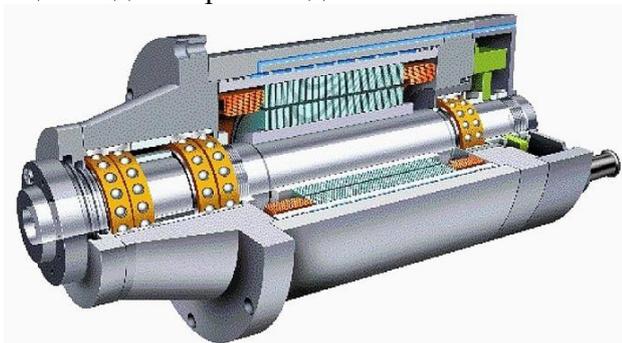


Рис. 1. Вид современного мотор-шпинделя.

Широкое распространение мотор-шпиндели получили в прецизионных многоцелевых станках (фрезерно-расточных станках с ЧПУ, шлифовальных, токарных станках и др.). Электродвигатели применяются 2 типов: асинхронный и синхронный. Которые отличаются показателями мощности и частоты вращения.

На рис.2 изображена схема мотор-шпинделя.

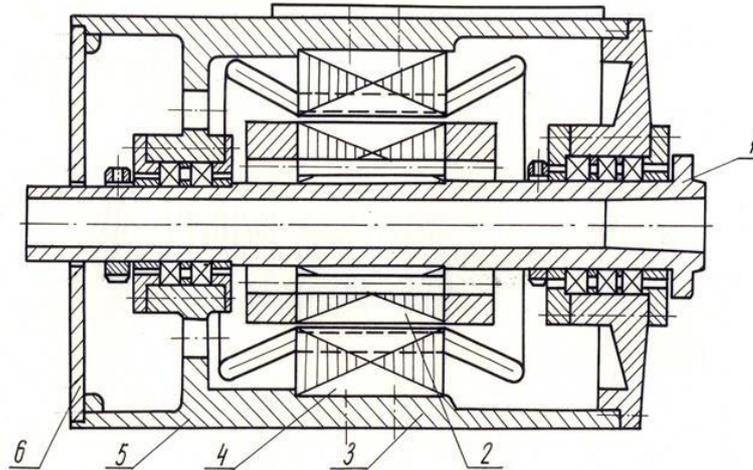


Рис. 2. Схема мотор-шпинделя:

1- шпиндель, 2- ротор, 3- корпус статора, 4- статор, 5- корпус, 6- задняя стенка.

Преимуществами мотор-шпинделей являются их малые габариты и вес, достигаемые специфической компоновкой двигателя и шпиндельного узла. Компоновкой достигается бесступенчатость регулирования частоты вращения, а также уменьшение размеров и веса шпиндельного узла за счет отсутствия коробки передач и других механизмов. Это же и позволяет сделать шпиндель почти бесшумным. В то же время такое устройство очень сложное и дорогое.

На рис.3 изображен типичный график мощности и момента мотор-шпинделя с асинхронным электродвигателем.

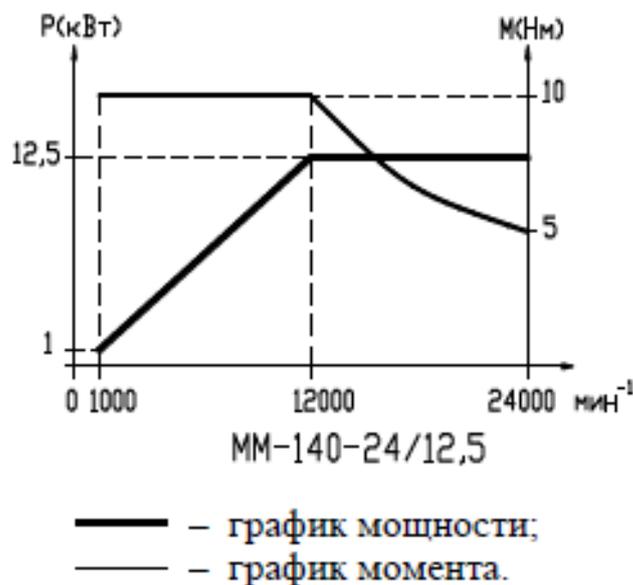


Рис. 3. График мощности и момента мотор-шпинделя с асинхронным двигателем.

Основными узлами мотор-шпинделей являются высокоскоростные прецизионные подшипники, обеспечивающие высокую частоту вращения (до 80000 об/мин – у синхронного электродвигателя и до 24000 об/мин – у асинхронного) и динамическую грузоподъемность (до 20000 Н при $d=50\text{мм}$). Но стоит учесть, что они также очень чувствительны к перегрузкам, следствием которых может стать преждевременный износ и даже разрушение шпиндельных опор. За счет новых технологий и применения новых материалов шариков подшипников (керамика) шпиндель может достигать высоких частот вращения (до 80000 об/мин). При этом опоры повышают виброустойчивость шпинделя, что часто сказывается на результатах работы станка. При соблюдении всех требований по нагрузкам (в основном от сил резания),

температурным (соблюдение температурного режима) и скоростным режимам (ограничение частоты вращения шпинделя) данные опоры позволяют доводить выработку подшипников до 40000ч.

Трудностями управления двигателями мотор-шпинделей является проблема векторного управления обмотками электродвигателей шпинделя, решаемая в системах ЧПУ - программированием систем векторного управления, смотреть рис.4.

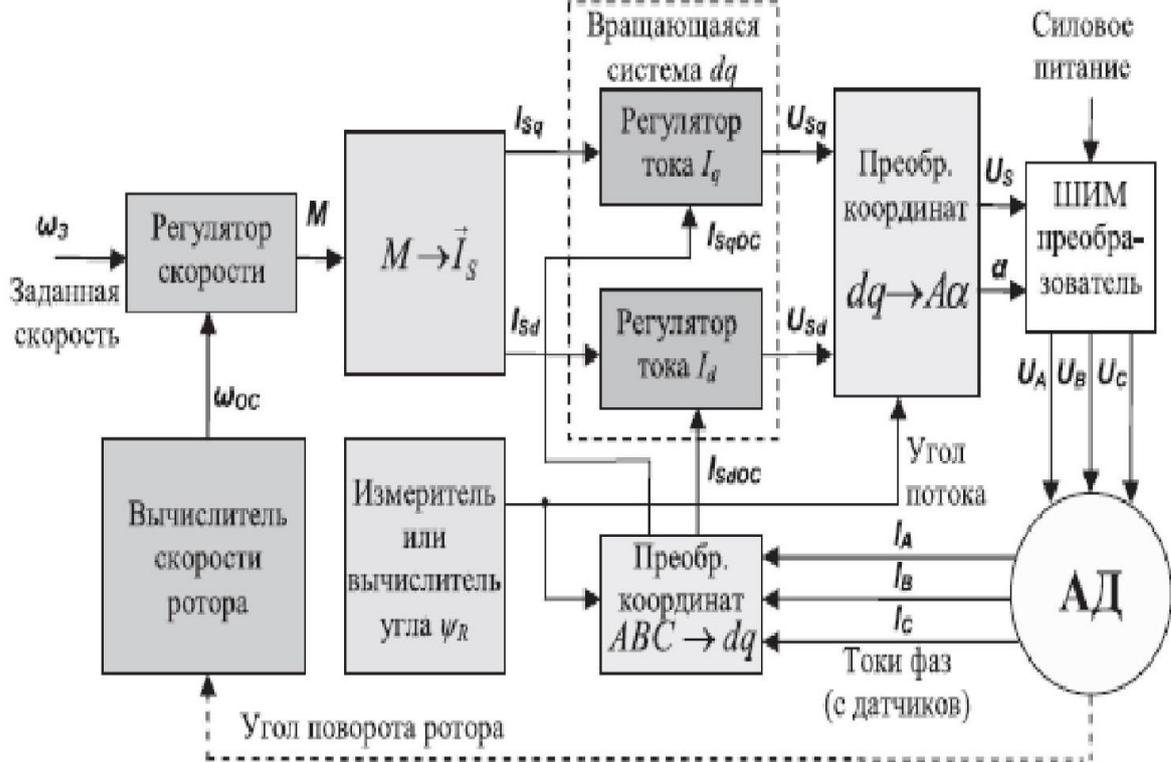


Рис. 4. Упрощенная структура системы векторного регулирования.

Одними из главных проблем мотор-шпинделей является необходимость принудительного охлаждения и постоянного смазывания подшипниковых узлов. Охлаждение необходимо, потому что точность шпинделя зависит от температуры шпинделя и опор, на которые воздействует теплота от подшипников, теплота, выделяемая электродвигателем, и теплота от процессов трения и резания. Охлаждение осуществляется путем кондиционирования или путем водяного охлаждения водой или тосолом, смотреть рис.5.

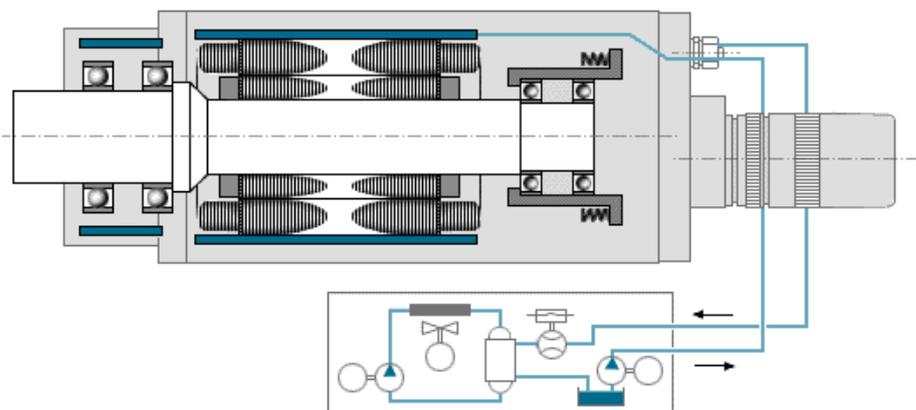


Рис. 5. Система водяного охлаждения мотор-шпинделя.

Среди особенностей мотор-шпинделей выделяется сложность механического закрепления инструмента или детали с базированием по конусу HSK, обеспечивающем необходимое осевое центрирование и базирование по плоскости, которое позволяет уменьшить погрешность обработки от погрешности настройки инструмента. Для уменьшения биения и вибраций при высокоскоростной обработке необходимо использовать точный и дорогой инструмент, что также влияет на стоимость технологии.

Проведенная оценка позволяет сделать вывод о рациональности применения мотор-шпинделей в современных технологических машинах и развития этого типа приводов главного движения для все большего круга многоцелевых станков. В России пока малое внимание уделяется мотор-шпинделям, но в будущем скорее всего их использование и производство увеличится.

Литература

1. П.М. Чернянский, Проектирование автоматизированных станков и комплексов: учебник в 2 т. – 2-е изд., испр.-- М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
2. О.В. Таратынов, Металлорежущие системы машиностроительных производств: учебное пособие для вузов— 2-е изд., испр. и доп. — М.: Изд-во МГИУ, 2006. — 488 с.
3. Чернов Н.Н., Технологическое оборудование (металлорежущие станки): учебное пособие СПО – Ростов-на-Дону : Изд-во Феникс, 2009. –496 с.
4. Королев Э. Г., Юденков Н. П., Арапов А. Н. Мотор – шпиндели для станков с ЧПУ / Станки и инструмент. –1986. – № 2. – С. 8-9.

УДК 621.9.06

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ТОЧНОСТИ СТАНКОВ

Елена Николаевна Курылюк

Студент 5 курса

кафедра «Металлорежущие станки и комплексы»

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: Б.М. Дмитриев

доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и комплексы»

Металлорежущий станок это машина для производства деталей, которые не существуют. Основная задача станка это образование формы детали.

Форма детали образует структуру будущего изделия, а качество поверхностей формирует качество будущего изделия.

На сегодняшний день качество поверхностей производимых деталей характеризуется следующими показателями:

- это погрешность размера, которая обеспечивает взаимозаменяемую сборку;
- это отклонение формы и расположения. Эти отклонения обеспечивают качество станков, как подвижных так и неподвижных. Волнистость поверхности особенно проявляется в подшипниках качения. Шероховатость влияет на качество работоспособности сопряжений.

Показатели качества поверхности производимых деталей постоянно изменяется как по номенклатуре так и по величине.

Непрерывно возрастающее значение машин во всех отраслях производства вызвало бурное развитие станкостроения — технической базы всей машиностроительной промышленности. Чем больше масштабы производства машин, тем более массовым должен быть выпуск деталей, тем более совершенными и производительными должны быть станки, обеспечивающие обработку необходимых деталей.

Начиная еще с каменного века, применялись простейшие токарные устройства для обработки деревянных и каменных изделий с цилиндрическими и фасонными поверхностями. Для работы на таких приспособлениях требовалось одновременное участие двух человек. Один должен был двигать лук и придавать заготовке вращательное движение, а другой – резцом выполнять обработку изделия. Характерны низкая точность и низкая производительность.

Позднее стали использоваться ножной и ременной приводы, значительно упрощавшие ручной труд человека и увеличивающие производство. Первоначально станки были с классической горизонтальной компоновкой. Изменялся лишь привод для ускорения вращения заготовки (ручной – лучковый – ножной – ременной).

Но все эти машины требовали повышения точности обработки деталей. Эта задача могла быть решена только с изобретением металлорежущих станков с механическим суппортом.

Уже в начале XVIII века приспособление для обработки резанием превратилось в станок. В 1712 году Андрей Нартов создал и запатентовал механизированный суппорт, а несколькими годами позже им же была рассчитана зависимость скорости вращения заготовки и подачи суппорта. Это способствовало началу использования новых режимов резания – нарезание винтов (до этого обрабатывались лишь цилиндры и фасонные поверхности).

Но изготовление частей этих машин, требовавшее точности в размерах, упиралось в отсутствие соответствующего оборудования и измерительных инструментов.

В 1769 г. Джеймс Уатт, преодолевая большие затруднения в изготовлении паровой машины, необходимо было расточить цилиндр с достаточной точностью. Ему удалось точно просверлить паровой цилиндр, даже в наихудших местах между поршнем и цилиндром нельзя было просунуть полукрону - английскую монету. Если с помощью измерительных приборов того времени можно было изготавливать некоторые изделия в массовом и серийном порядке с точностью до тысячных долей миллиметра, то точность, удавшаяся, наконец, Уатту, была грубее примерно в 2 тысячи раз.

Уатту приходилось уплотнять зазоры между поршнем и цилиндром своей паровой машины бумагой, замазкой и даже кусками собственной шляпы. Однако, требования к качеству и точности изготовления частей все повышались.

Еще раньше, чем Уатт достиг точности полукроны, в октябре 1760 г., Ричард Рейнольдс.

В 1765 г. англичанин Смитон изобрел машину для расточки цилиндров. Эта машина состояла из штанги с диском, приводимым в движение с помощью водяного колеса и системы зубчатых колес. На окружности диска были размещены стальные ножи.

Только через 10 лет, в 1775 г. англичанин Вилькинсон построил более совершенную расточную машину. Ножи Смита только скоблившие металл, были заменены режущим инструментом – резцом. Точность обработки машиной Вилькинсона достигла уже 1,5 мм.

Только около 1800 г. англичанин Модслей изобрел к ручному токарному станку суппорт – призматическую подвижную колодку, которая служит для закрепления резца, имеет возможность скользить вдоль станка параллельно изделию и поперек станка перпендикулярно изделию. Благодаря этому суппорт сообщает резцу необходимые движение и точное положение по отношению к обрабатываемому изделию.

В начале XIX в. изобретается фреза. В 1818 г. Эли Витней в США применил для этого инструмента специально построенный фрезерный станок, резко подвинувший вперед технику обработки металлов.

В 1867 г. в Париже была организована очередная международная промышленная выставка. Техника станкостроения к этому времени уже значительно выросла. США показали Европе не виданные до того образцы всех перечисленных станков. Точность обработки, которая сто лет назад определялась толщиной мизинца Рейнольдса и полукроной Уатта, на этих станках дошла до 0,1 мм.

В 1870 г. изобретается шлифовальный станок, в котором металлический режущий инструмент заменяется шлифовальным кругом. Точность обработки стала выражаться уже сотыми и тысячными долями миллиметров.

Во многом это было связано с работами известного английского станкостроителя Д. Витворта, внесшего в машиностроение принципы и методы точной работы. Витворту принадлежит изобретение первой измерительной машины; он ввел в практику машиностроения измерительные калибры и добился возможности измерять обрабатываемые поверхности с точностью до сотых, а позже и до тысячных долей миллиметра. Калибры Витворта, допускавшие точность пригонки машинных деталей порядка одной десятичной доли дюйма, составляли уже в 80—90-х годах 19 века неотъемлемую принадлежность каждого крупного машиностроительного завода в Европе и Америке. В последние годы жизни Витворта его предприятие могло изготавливать измерительные машины, обеспечивавшие точность до одной миллионной доли дюйма. На заводе Витворта были впервые реализованы принципы стандартизации и взаимозаменяемости резьбы на винтах, нашедшие впоследствии широчайшее применение в машиностроении и ставшие основой создания унифицированных и стандартных деталей и узлов машин.

К началу XX века станок приобретает черты современного станка: наличие электропривода, коробки скоростей, коробки подач, задней бабки.

Но уже в период 60-80 годов предпринимается попытка изменить структуру парка МРС для повышения точности обработки и других показателей.

В результате этого в 60-ые годы прошлого века появляется Числовое Программное Управление (ЧПУ). Оно совершило революцию в станкостроении и производстве таким образом, что дало возможность автоматизировать практически все действия на станке вплоть до установки/съема детали и контроля обработки. Более не требовалось применение физической силы со стороны человека, только контроль работы ЧПУ и подготовка заготовок.

С появлением ЧПУ стали возможными изменения в компоновке и конструкции станка. Из-за невмешательства человека в ход работы станка появились наклонные на 45 градусов станины, позволяющие сбрасывать стружку прямо во время работы станка, тем самым не загрязняя его. Стала возможной компоновка с вертикальным шпинделем для обработки больших по диаметру и тяжелых по весу деталей. На протяжении многих лет был проведен целый комплекс работ, связанных с решением задач по созданию высокопроизводительных и прецизионных МРС. Причем эти работы велись не только в области исследования станков, но и в области создания соответствующих производственных мощностей, удовлетворяющих условиям изготовления точных деталей, узлов и станков, а также обеспечения их соответствующими комплектующими изделиями.

Проблема обеспечения точности обработки в пределах нескольких микрон достигалась применением узлов, деталей и элементов точных и особо точных исполнений.

Разработаны и поставлены на серийное производство особо точные подшипники качения для шпинделей и механизмов, подачи, гидростатические опоры шпинделей и направляющих тяжелых карусельных и продольно-фрезерных станков, аэро-статические опоры для шпинделей и направляющих особо точных токарных станков, работающих алмазным инструментом.

В результате указанных выше и других работ, которые проводились, появилась возможность изготавливать координатно-расточные и круглошлифовальные станки, позволяющие обрабатывать цилиндрические поверхности с отклонением от круглости в пределах двух-трех десятков микрометра и шероховатостью менее одной десятой. Создание зубообрабатывающих мастер-станков явилось логическим завершением огромного комплекса исследований по повышению точности станков, проведенных учеными и инженерно-техническими работниками станкостроения.

Основываясь на развитии станкостроения с каменного века, можно сказать, что еще одна тенденция в производстве была направлена на концентрацию действий по обработке деталей в одном месте (на станке).

В результате станкостроение смещается от производства отдельных специализированных к многоцелевым станкам (МЦС), совмещающим максимально возможное число операций, к созданию гибких, программно-управляемых обрабатывающих центров с возможностью последующей автоматизации производства. Современные станки ведущих зарубежных компаний обеспечивают колоссальную производительность при высокой точности. Такой подход значительно расширяет возможности серийного образца без его серьезной реконструкции, избавляя от необходимости приобретать специальные станки.

МЦС освободили рабочего, как от силовых, так и от большинства логических функций. В этом отношении МЦС не просто автоматизированный вариант своих предшественников, а качественно новый станок, позволяющий организовать малолюдную технологию обработки заготовок. Автоматизация этих функций предопределила и качественно новые технологические возможности этих станков. Главным образом, эти возможности выражаются в преобразование практически неограниченного объема информации об обработке заготовки в рабочий процесс без участия человека. Эта особенность и является принципиальным отличием МЦС от обычных станков, и предопределяет дальнейшие пути развития МЦС с учетом передачи функций рабочего не только машине, но и системе ЧПУ.

Все чаще оборудование оснащается линейными двигателями, что обеспечивает меньший шум и длительное время сохранения точности линейных перемещений.

Сегодня станок представляет собой комплекс Механики, Электроники (системы ЧПУ и контроллеры) и разумеется ПО (Программное обеспечение). Эти элементы неотделимы друг от друга, но их базовые свойства в динамике развития, гибкости, потенциале возможностей, да и в природе себестоимости определяют, скорее всего, следующие тенденции:

- максимальное упрощение «Механики» как базы для всего последующего, с возрастающим использованием принципа модульности на основе серийных стандартных узлов и определённой стабилизацией себестоимости;

- динамичное развитие электроники с расширением возможностей в разрешающей способности, скорости обработки и объёме обрабатываемой информации. Возможно, параллельности технологических процессов с архитектурой дальнейшего объединения в единую систему. К динамике развития электроники мы уже привыкли в самых различных отраслях. Предсказуемы и тенденции себестоимости: всплеск в «топовых» моделях с достаточно динамичным и значительным снижением при продвижении в серию. Здесь тоже предсказуема модульность.

- программное обеспечение. Сегодня, в первую очередь, эта реализация процесса изготовления детали несколько ограниченная. Тенденция развития ПО ведёт в программирование задачи изготовления детали на высоком уровне, интеллектуализации оборудования, его «очувствления», т.е. контролю до, после, и в процессе обработки и, соответственно, динамической оптимизации обработки. Причём динамика развития ПО наиболее высока и представляемые ею всей системе возможности и гибкость очень широки. Также очень высока на сегодня и социальная привлекательность IT-технологий и электроники.

В заключении отметим, что покупатели современных станков ориентируются в первую очередь на такие характеристики, как своевременность и точность изготовления деталей при низких на это затратах. Таким образом, точность обработки деталей в машиностроительной промышленности имеет огромное экономическое значение, обуславливающее необходимость повышения производительности труда при одновременном увеличении степени точности обработки. Для решения этой задачи необходимо выявить, какими причинами вызываются отклонения в точности обработки, и затем разработать рациональные методы устранения или уменьшения их влияния.

На данном этапе повышение точности достигается высококачественным изготовлением основных узлов, а так же все более востребованы будут многофункциональные обрабатывающие центры, способные осуществлять полный цикл обработки за одну установку заготовки.

Литература

1. http://www.equipnet.ru/articles/power-industry/power-industry_348.html
2. <http://www.stanki.cc/pubs/1007.html>
3. <http://stanki-uchpu.ru/history/history-of-razviniyu-stankostroenia.html>
4. <http://mehanit.ru/novosti/razvitie-stankov.php>
5. *Перля З. Н.* Путь к микрону - Москва, Ленинград: ОНТИ, 1936. - 107 с.

УДК 621.941

ПУТИ РАЗВИТИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Виталий Андреевич Плетнев

Студент 2 курса

кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Г. Ягопольский

старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»

Основным средством механизации металлорежущего станка служит привод. Приводы бывают пневматические, гидравлические и электрические. Пневмопривод, как правило, применяется в механизмах для смены или зажима инструмента. Гидропривод также применяется в механизмах смены или зажима инструмента, зажима и разжима заготовки, а также в некоторых конструкциях приводов подачи шлифовальных станков. Электропривод применяется в приводах главного движения и приводах подачи. Все приводы имеют свои плюсы и минусы. Привод состоит из двигателя, передаточных устройств и системы управления.

Станок может быть оснащен различными типами приводов в зависимости от степени выполняемых функций и количество этих приводов может быть различным. В металлорежущих станках наряду с другими типами приводов, в основном, используются электроприводы с асинхронными, синхронными электродвигателями переменного тока, а также двигатели постоянного тока (ДПТ). Современные автоматизированные электроприводы представляют собой сложные динамические системы, обеспечивающие в своем взаимодействии разнообразные статические и динамические характеристики.

Тенденции развития электропривода отражают как общие направления развития электротехники и электроники, так и особенности конструкции данной технологической машины (например: металлорежущего станка), поэтому задачи анализа, выбора, расчета и проектирования подобных систем приобретают важное значение.

Асинхронные двигатели (см. рис. 1) - наиболее распространенный вид электрических машин. Достоинства асинхронного двигателя: простота конструкции, простота эксплуатации, высокая надежность и способность к перегрузкам, отсутствие щеточно-коллекторного узла. Благодаря этим свойствам асинхронный двигатель широко применяется в промышленности для привода металлорежущих станков и других технологических машин. Однако управление частотой вращения асинхронного двигателя в широком диапазоне значительно сложнее, чем двигателя постоянного тока (ДПТ). Это ограничивает применение асинхронных двигателей в тех случаях, когда необходимо изменять частоту вращения двигателя в широких пределах. Однако в связи с быстрым развитием силовой электроники и появлением современных транзисторов MASFET и IGBT возросло применение асинхронных двигателей с частотным регулированием скорости.

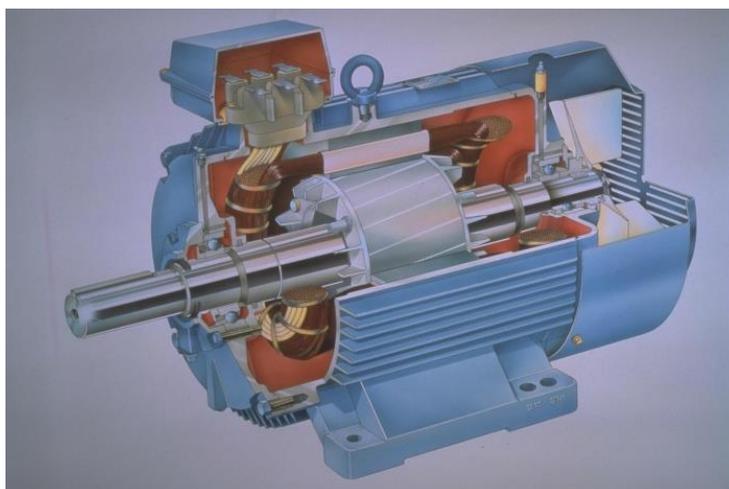


Рис. 1. Типовой асинхронный двигатель.

Синхронные двигатели (см. рис. 2) также применяются в металлорежущих станках. В конструкции синхронных двигателей различают две основные части - статор и ротор. Статор двигателя имеет конструкцию, аналогичную статору асинхронного двигателя. Ротор синхронного двигателя в настоящее время изготавливается с применением редкоземельных магнитов. Преимущества синхронных электродвигателей: сохранение постоянства числа оборотов при различных нагрузках. К недостаткам синхронных электродвигателей можно отнести выпадение из синхронизма при перегрузке и сложность системы управления.

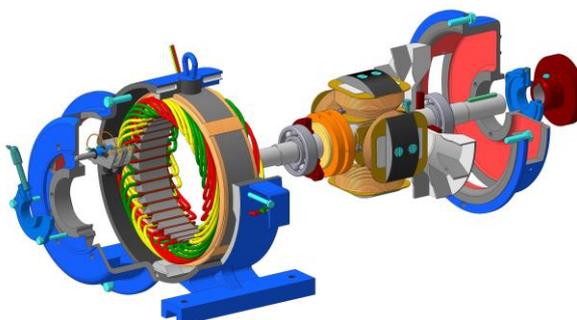


Рис. 2. Типовой синхронный двигатель.

Двигатели постоянного тока (ДПТ), см. рис. 3, имеют более простую систему управления, чем асинхронные и синхронные двигатели. В конструкции ДПТ применяются подшипники скольжения с комбинированной (кольцевой и принудительной проточной) системой смазки. К прочим преимуществам ДПТ следует отнести следующее: возможность плавно, и в широких пределах регулировать частоту вращения; значительный пусковой момент и одновременно незначительный пусковой ток; способность к перегрузкам. Самым главным недостатком ДПТ является ограниченный срок службы щеточно-коллекторного механизма из-за наличия скользящего контакта между щетками и коллектором.

Поскольку ДПТ используются во многих областях промышленности, знание принципов работы и управления ими необходимы при проектировании и обслуживании автоматизированных металлорежущих станков и промышленной робототехники. ДПТ работают на постоянном токе и для их питания необходимы аккумуляторная батарея или выпрямитель. Управление двигателем осуществляется внешней электронной схемой, использующей твердотельные приборы типа транзисторов и тиристоров.

ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

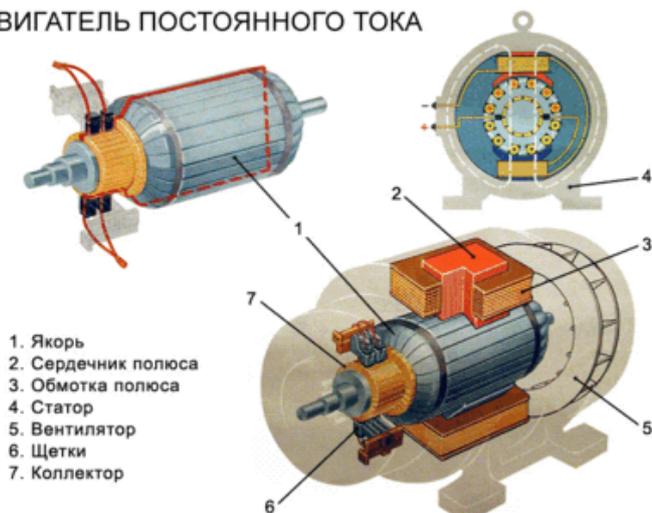


Рис. 3. Типовой двигатель постоянного тока.

Совершенствование электропривода и полупроводниковой элементной базы тесно связано с развитием полупроводниковой техники, являющейся базой для создания силовых преобразователей и схем управления. Происходит непрерывное улучшение технических характеристик тиристорных, которые являются основным силовым элементом электропривода, но обладают ограниченным управлением. Создаются более перспективные, полностью управляемые транзисторные силовые преобразователи. Повышение степени интеграции полупроводниковых устройств выражается в создании силовых полупроводниковых модулей, что позволяет повысить надежность преобразователя, уменьшить его размеры и упростить монтаж. Важным направлением развития элементной базы является создание специализированных интегральных схем для системы управления приводом. Такие схемы включают в себя устройства управления силовыми тиристорами, регуляторы привода, блоки токоограничения и др.

Для расширения функциональных возможностей электропривода важным направлением является адаптивное управление, повышающее производительность и точность обработки. В системах адаптивного управления обычно стабилизируют один из параметров технологического процесса, например силовой фактор (сила, момент). При этом скорость привода подачи регулируется так, чтобы поддерживать заданный режим работы главного привода. В более сложных системах управления изменяют одновременно скорости главного привода и привода подачи. При этом достигается максимум некоторого показателя эффективности с учетом ограничений, например по жесткости конструкции технологической машины и др.

Современный электропривод может быть осуществлен только на микропроцессорной основе. Электропривод с микропроцессорным управлением характеризуется повышенной точностью, отсутствием дрейфа нуля усилителей, гибкостью системы управления, универсальностью и простотой сопряжения с управляющей вычислительной машиной, высокой надежностью и возможностью диагностики. Однако на пути создания цифровых электроприводов возникают трудности, связанные с недостаточным быстродействием микропроцессоров. Преодолеть их можно как путем использования более быстродействующих устройств, так и путем перехода на многопроцессорные системы с параллельной обработкой информации. Применение микропроцессоров позволяет создать новые системы управления электроприводом металлорежущих станков. Это сложные системы управления электроприводом, аппаратная реализация которых затруднена из-за большого числа элементов и громоздкости алгоритма управления.

Литература

1. Джеймс А. Рег, Гленн Дж. Сартори. Промышленная электроника, -М.: ДМК Пресс, 2011 год, 1136 стр.
2. Соколовский Г.Г., Электроприводы переменного тока с частотным регулированием, изд-во: АCADEMIA, 2006 год, 267 стр.
3. Васильков Д.В., Электромеханические приводы металлообрабатывающих станков. Расчет и конструирование, изд-во: ВУЗ, 2010 год, 759 стр.
4. П.М. Чернянского, Проектирование автоматизированных станков и комплексов: учебник: в 2 т. - М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012 год, 310 стр.

УДК 621.941

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ СТАНИН МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Виталий Андреевич Плетнев

Студент 2 курса

кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Г. Ягопольский

старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»

Большинство изделий машиностроения, требующих высокую точность изготовления подвергаются механической обработке на металлорежущих станках.

Конструкции современных металлорежущих станков разнообразны и состоят из большого количества узлов, механизмов и агрегатов, которые базируются на станине станка. Станина является основанием станка, от прочности, жесткости и износостойкости которой зависит качество его работы, т.е. технические и эксплуатационные характеристики станка. Станина должна обеспечивать правильное взаимное положение узлов и частей станка на базирующих поверхностях.

Главные показатели, которыми должны обладать станины: точность изготовления всех ответственных поверхностей для обеспечения требуемой геометрической точности; долговечность, которая выражается в стабильности формы базирующих поверхностей и способности направляющих сохранять первоначальную точность в течение заданного срока эксплуатации; малые температурные деформации, из-за которых могут произойти относительные смещения между инструментом и заготовкой; высокие демпфирующие свойства, то есть способность гасить колебания между инструментом и заготовкой под действием различных источников вибраций.

Конструкции и формы станин определяется требованиями жесткости, виброустойчивости, длительного сохранения точности, минимально возможного веса, зависят от расположения направляющих (горизонтальных, вертикальных, наклонных), от размеров и длины ходов подвижных узлов станка, от условий удаления стружки и смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), от необходимости расположения внутри станины различных механизмов, агрегатов и резервуаров для масла и СОЖ, от удобства проведения ремонтных работ и т.п. Форма станин обычно приближается к коробчатой с внутренними стенками и перегородками, которые нужны для повышения жесткости и образования отдельных полостей и отсеков, см.рис.1.

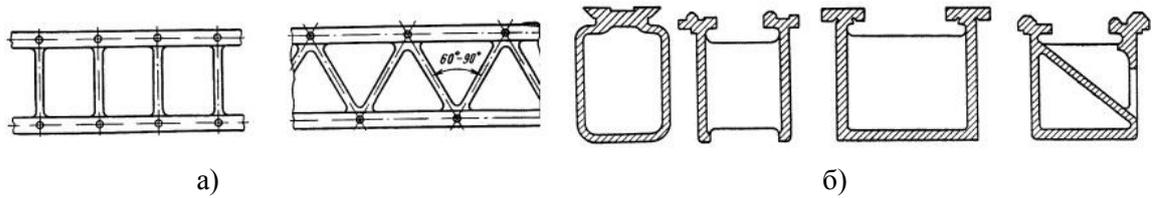


Рис. 1. Формы и типы сечений станин:
а-формы ребер станин; б-типы сечений станин.

Станины, как правило, бывают горизонтальными, вертикальными (стойки) и порталными.

Горизонтальные станины (см. рис. 2) широко применяются из-за облегчения условий работы станин в результате совместной работы с фундаментами; простоты и жесткости установки тяжелых и длинных изделий на столах горизонтальных станин; удобства наблюдения за зоной резания при обработке поверхности изделий значительной длины. С горизонтальными станинами выполняется подавляющее большинство станков токарной группы для изготовления цилиндрических изделий - это токарно-винторезные, токарно-револьверные, кругло- и внутришлифовальные и др. станки.

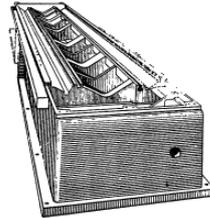


Рис. 2. Горизонтальная станина.

Вертикальные станины или стойки (см. рис. 3) обычно применяются в станках, в которых необходимы вертикальные относительные перемещения инструмента и изделия. Основное применение вертикальных станин - в станках с вертикальными шпинделями или вертикальным ходом ползунов. Вертикальные станки имеют меньшие габариты в плане и представляют значительные преимущества с точки зрения удобства обработки для большой группы изделий, в которых по технологическому процессу ось шпинделя или ход ползуна должны быть перпендикулярны к основной базовой поверхности изделия. По конфигурации вертикальная станина с корпусными деталями может образовывать незамкнутый (открытый) контур, как это имеет место у сверлильных, расточных, вертикально-фрезерных и др. станков.

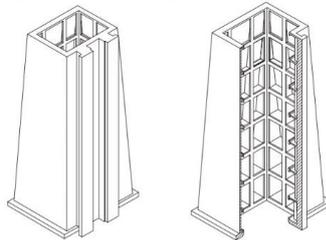


Рис. 3. Вертикальная станина (стойка).

Станины portalного типа обладают повышенной жесткостью по сравнению со станинами одностоечных и горизонтальных станков. Такие станины состоят из основания или горизонтальной станины, двух стоек, перекладины и поперечины, соединенных между собой и образующих рамную систему (замкнутый контур). Это станины продольно-строгальных и продольно-фрезерных станков, зубофрезерных, некоторых токарных многолезцовых и других станков.

Расчетная схема станины выбирается обычно, как балки или рамы. Для горизонтальных станин - это двухопорные балки с расчетной длиной l_p (см. рис.4,а). Вертикальные станины (стойки) заменяются консольными балками или открытыми рамами (см.рис.4,б) с расчетной длиной

$l_p = l_{p1} + l_{p2}$ деформируемой части. Для порталных станин расчетной схемой будет жесткая статически неопределимая рама (см.рис.4,в). При выборе расчетной схемы соединение поперечины со стойками считается шарнирным, а портал рассматривается как симметричная рама.

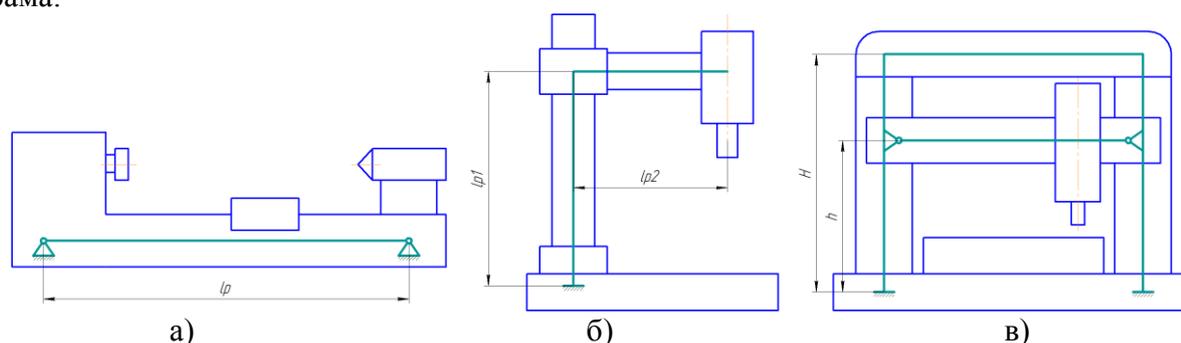


Рис. 4. Расчетные схемы станин:

а-горизонтальная станина; б-вертикальная станина; в-портальная станина.

Основными критериями оценки работоспособности станин являются жесткость и виброустойчивость. В процессе работы, станины подвергаются изгибным и крутильным деформациям. В соответствии с этим они проверяются на статическую жесткость изгиба и статическую жесткость кручения.

Станины и корпусные детали по весу составляют 80-85% от веса станка. Таким образом, экономия металла в станкостроении наиболее эффективна в направлении снижения веса этих деталей.

Подавляющее большинство станин металлорежущего оборудования изготавливаются методом литья из серого чугуна. Достоинствами чугуна как материала для базовых корпусных деталей (т.е. станин) является возможность изготовления отливок практически любой формы. У чугуна лучше, чем у стали обрабатываемость, более высокая циклическая вязкость, и, следовательно, лучшая способность гасить вибрации. Заготовки станин отливают чаще всего в формы из песчанно-глинистых смесей. При заливке заготовку располагают основанием вверх, что позволяет обеспечить на расположенных внизу формы привалочных плоскостях и направляющих плотную структуру материала с меньшими литейными дефектами.

Конструирование и изготовление качественных базовых и корпусных деталей, к которым относится станина – сложная конструкторско-технологическая задача. Решение данной задачи- это поиск компромиссного решения между противоречивыми требованиями: созданием жестких конструкций, но имеющих малую массу; простых по конфигурации, но обеспечивающих высокую точность; дающих экономию металла, но учитывающих особенности и возможности литейной технологии при проектировании литых станин современных металлорежущих станков.

Литература

1. П. М. Чернянский, Проектирование автоматизированных станков и комплексов: учебник: в 2 т. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. Т. 1. — 336с., Т. 2. — 303с
2. Веренина Л. И., Ягопольский А. Г. Расчет и конструирование станков: учебник для студ. Учреждений высш. Образования. — М: Издательский центр «Академия», 2014 — 272с.
3. Мухин А.В., Спиридонов О.В., Схиртладзе А.Г., Харламов Г.А. Производство деталей металлорежущих станков: Учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов. — М: Машиностроение, 2001. — 560с.
4. Черпаков Б.И., Верейна Л.И. Технологическое оборудование машиностроительного производства. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 416 с.

УДК 621.941

ДИАГНОСТИКА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ ДВИЖЕНИЙ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ УЗЛОВ

Николай Валерьевич Терентьев, Егор Иванович Титков, Никита Евгеньевич Гострый

Студенты 4 курса,

кафедра «Металлорежущие станки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Г. Ягопольский,

старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»

Для металлорежущих станков, у которых основной критерий работоспособности – точность выполнения заданных функций, траектории формообразующих узлов (в частности – суппорта) становятся важнейшим источником информации о состоянии станка. Траектория перемещения узла – основной объект для измерения, оценки и анализа при программном испытании станка [1].

Содержание и характер диагностических процедур, глубина диагностирования, применяемые операции для обработки данных и другие этапы диагностики по параметрам траекторий поступательного движения суппортных узлов станков токарной группы зависят от объекта, предъявляемых к нему требований, аппаратных возможностей и других факторов. Однако последовательность этапов, их значение и роль в общем процессе оценки качества и параметрической надежности станка как результата диагностирования должны быть едиными для различных случаев, инвариантными к объекту диагностирования и отражать логику решения поставленной задачи. Поэтому может быть разработана типовая методика диагностирования по параметрам траекторий поступательного движения суппортных узлов станков, в качестве основы которой может рассматриваться алгоритм анализа траекторий формообразующей точки инструмента, закрепленного в суппорте (рис. 1).

Формирование и ввод исходных данных предусматривает, прежде всего, задание номинальных характеристик объекта диагностирования. Включая номенклатуру параметров траектории, используемую при выполнении конкретной задачи диагностирования. Исходные данные включают, в принципе, используемые в алгоритме (рис. 1), однако в дополнение к ним должны быть заданы:

- *диапазоны возможных режимов и условий эксплуатации станка (температура окружающей среды, внешние воздействия);*
- *наиболее форсированные режимы, экономические режимы чистовой обработки, а при наличии информации – гистограммы используемых при эксплуатации станка параметров режимов, например, подач;*
- *характеристики и требования, предъявляемые к лучшим образцам станков аналогичного назначения;*
- *требования к качеству деталей, обрабатываемых на диагностируемом оборудовании, и вытекающим из этого требованиям к отдельным характеристикам диагностируемого оборудования;*
- *предельно допустимые значения установленных параметров в соответствии с действующими стандартами, нормативами и требованиями заказчика.*

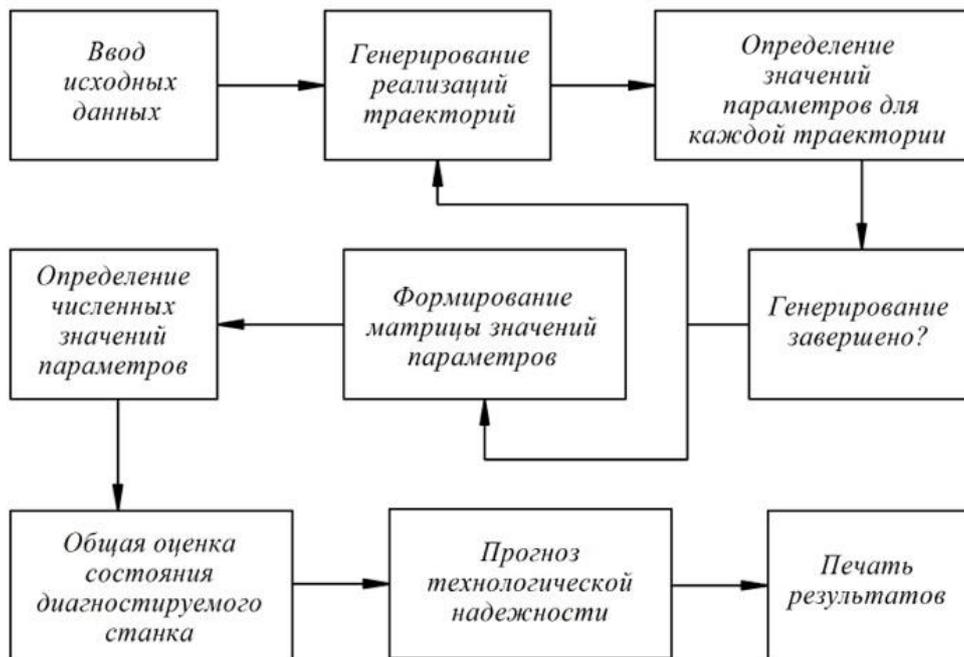


Рис 1. Алгоритм анализа траекторий формообразующей точки инструмента, закрепленного в суппорте, по управляющим параметрам.

Введенные данные должны однозначно задать условия реализации и параметры траектории формообразующего узла на основе которых будет осуществлен сбор и последующая обработка диагностической информации.

Основная информация, необходимая для диагностирования станка, поступает при проведении испытаний, в ходе которых регистрируются траектории формообразующих узлов станка. Методика предусматривает три принципиально различных способа формирования реализаций траекторий:

- генерирование на основе метода статистических испытаний (Монте-Карло) [2];
- при программном нагружении;
- при обработке заготовок – тестов.

Регистрация и последующие измерения параметров траектории осуществляют при:

- перемещении узла без нагрузки, когда основное влияние на отклонение траектории от заданной (теоретической) оказывают геометрические погрешности (изготовление, износ) направляющих;
- перемещении узла при фиксированной нагрузке, когда на отклонение траектории влияют также деформации элементов станка (контактные и собственные);
- фиксированном тепловом (холодное и прогретое) состоянии диагностируемого станка.

Если роль процесса резания в формировании теплового состояния станка незначительна (при экспериментальном подтверждении), то допустима оценка влияния основных источников тепловыделения при испытании станка на холостом ходу. Диагностирование должно учитывать весь спектр разнообразия возможных режимов обработки, условий эксплуатации станка и их статические характеристики.

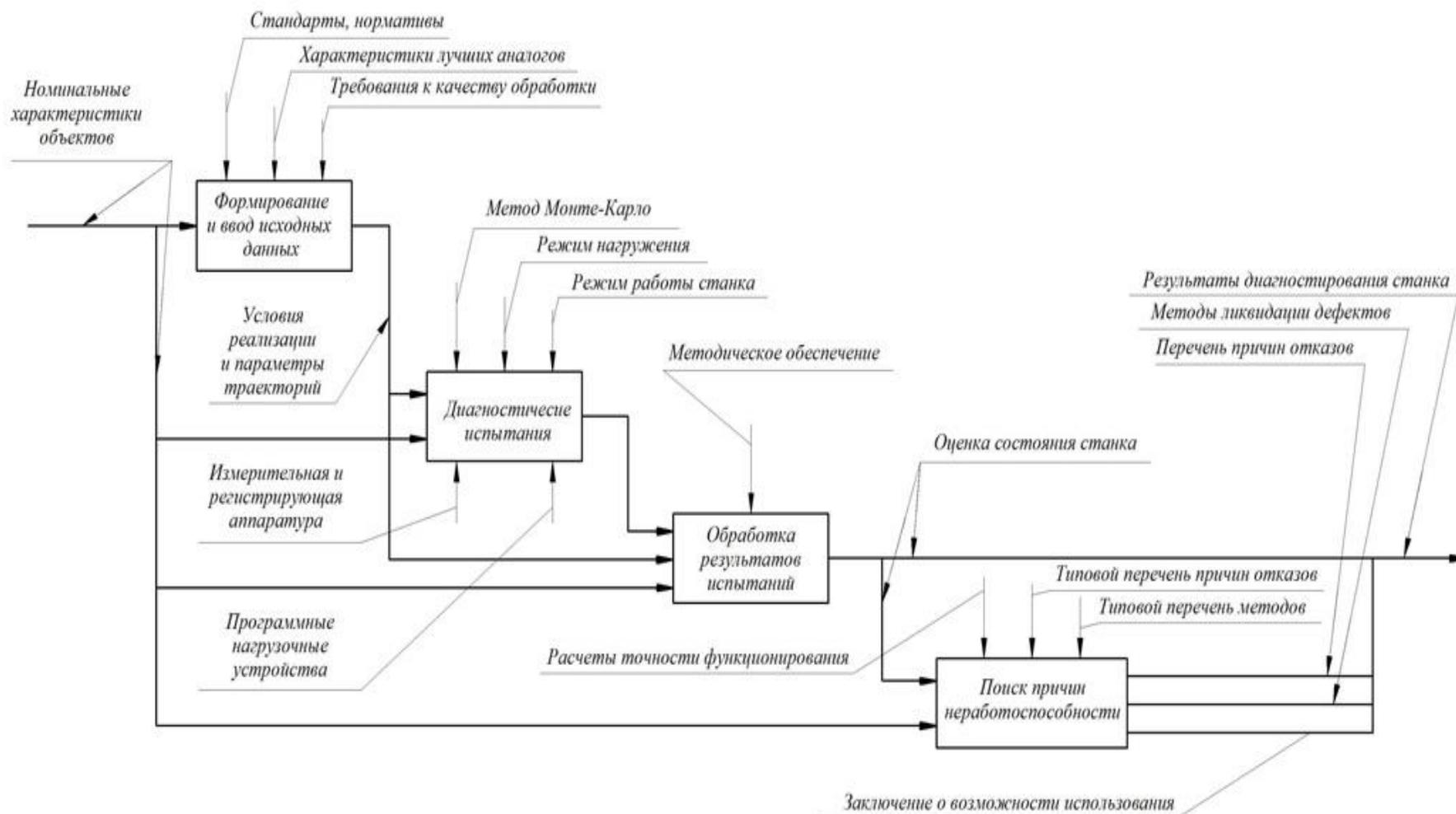


Рис. 2. Структурная диаграмма типовой методики диагностирования.

Завершающий этап диагностирования связан с поиском причин неработоспособности станка в настоящем и будущем. При этом устанавливают причины изменения состояния диагностируемого объекта и определяют методы устранения их отрицательного влияния. Выполнение этого этапа базируется на оценке состояния станка или оценке областей состояний всех регламентированных параметров. При этом рассматривают лишь параметры, у которых запас надежности близок к единице или меньше её. Учитывают сложившийся баланс факторов, определяющих динамику изменения выходного параметра [3].

Если испытываемый станок изношен незначительно и параметрические отказы по точности будут предположительно возникать лишь по отдельным выходным параметрам, то процесс диагностирования целесообразно проводить в следующей последовательности:

1. Выполнить оценку всех параметров при нагруженном наиболее форсированными режимами и прогревом станке.

2. Выполнить полный цикл нагружений при различных состояниях станка с оценкой тех параметров, у которых запас надежности меньше или равен единице.

3. Определить причины потери станком работоспособности.

Итоговые результаты диагностирования станка включают:

- *Оценку состояния (в настоящем) с указанием запасов надежности по важнейшим выходным параметрам;*
- *Перечень причин отказов (потери работоспособности) станка в настоящем и ближайшем будущем;*
- *Список методов ликвидации дефектов, приведших к параметрическим отказам;*
- *Заключение о возможности использования станка в его зафиксированном техническом состоянии.*

Литература

1. *Прошиков А. С.* Программный метод испытания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение. – 1985. – 288 с.
2. *Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В.* Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений – М.: Наука. 1969. – 511 с.
3. *Селиванов М. Н.* Неопределённость результата измерений и доверительная погрешность результата измерений // Измерительная техника. – 1994. - №8. – С. 20-32.

УДК 621.9.067

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ

Николай Валерьевич Терентьев, Егор Иванович Титков, Никита Евгеньевич Гострый

Студенты 4 курса

кафедра «Металлорежущие станки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Г. Ягопольский

старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»

Детали типа «вал» характеризуются тем, что образованы наружными поверхностями вращения около одной оси. Длина вала значительно больше диаметра. По назначению, конструкции, весу, точности обработки, материалу и другим показателям детали этого типа

очень разнообразны. В отдельных конструкциях возможно наличие внутреннего центрального отверстия.

Валы нашли широкое распространение в конструкциях практически всех технологических машин. В станкостроении встречаются валы ступенчатые и бесступенчатые, цельные и пустотелые, гладкие и шлицевые, валы-шестерни, а также комбинированные. В прокатном оборудовании применяют валы весом от нескольких килограммов до 30 т и более, при диаметрах до 1200 мм.

Существуют несколько методов обработки ступенчатых валов на токарных станках: без применения специальной технологической оснастки; с применением специальной технологической оснастки; на станках, оснащенных устройствами или суппортами для копировальной обработки. Как правило, токарная обработка ступенчатых валов производится не менее чем за два установа. При этом за первый установ полностью обрабатывается один конец вала, а за второй другой. Обработка длинных ступенчатых валов, где отношение длины к диаметру более 10, является одной из наиболее трудоемких операций. Это связано с малой жесткостью заготовки, вибрациями, сложностью достижения заданного качества, точности и производительности.

Для повышения производительности и качества обработки длинных цилиндрических поверхностей обычно применяют различные подводимые опоры (например, люнеты), повышающие жесткость заготовки. При этом схема установки люнетов, их конструкция, характер закрепления, выбор технологических баз оказывают решающее влияние на производительность обработки и точность диаметральных размеров вала. Схема установки опор, их конструкция, характер закрепления, выбор технологических баз оказывают решающее влияние на производительность обработки и точность диаметральных размеров вала [3]. Наибольшей трудоемкостью, с точки зрения выбора конструкции и мест установки люнетов, а также их настройки, отличается обработка валов в центрах. Выбор наружной поверхности вала в качестве технологической базы позволяет повысить производительность и точность обработки.

Как было сказано выше при обработке длинномерных валов на станках токарной группы применяются вспомогательные станочные приспособления – люнеты. Неподвижные люнеты позволяют зафиксировать заготовку на одном определенном диаметре, и остаются неподвижными до конца обработки. Подвижные люнеты имеют возможность перемещаться по поверхности обрабатываемой заготовки во время обработки, однако ограничением является неизменность диаметра цилиндрической поверхности базирования детали в люнете. В случае ступенчатой поверхности детали возникает либо ограничение по перемещению люнета, а соответственно и резца, либо необходимость останавливать обработку, устанавливая люнет на следующей поверхности и возобновлять обработку, что влечет за собой увеличение погрешностей и времени изготовления деталей.

Изготовление длинномерной ступенчатой детали типа вал за один переход позволило бы уменьшить погрешности и вспомогательное время изготовления данной детали. Применение специальной конструкции люнета, позволяющей динамически изменять установочный диаметр в процессе обработки, позволит решить поставленную задачу. Внешний вид люнета представлен на рис. 1.

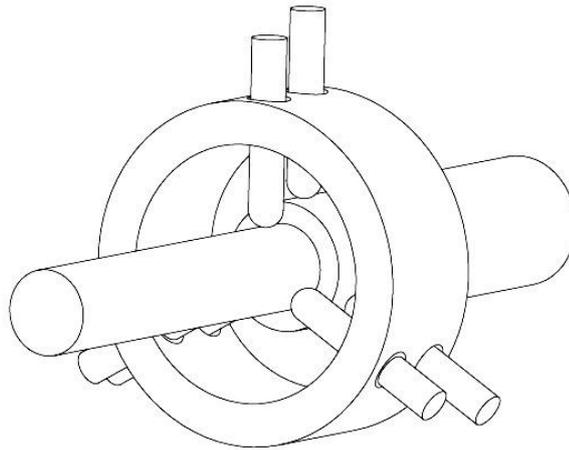


Рис. 1. Внешний вид люнета.

В данном случае это возможно с динамическим изменением установочного диаметра люнета при переходе на следующий участок поверхности. Реализовать слежение системы за установочным диаметром возможно с использованием гидравлической системы со следящим золотником, см. рис. 2, применяющейся в копировальных станках. В этой схеме регистрацию усилия в осевом направлении осуществляет гидроцилиндр ГЦ1. Гидроцилиндры ГЦ2, ГЦ2', ГЦ2'' осуществляют разжатие стержней люнета в радиальных направлениях. Гидроцилиндр ГЦ3 осуществляет смещение люнета в осевом направлении для компенсации времени перехода с одной поверхности ступенчатого вала на другую.

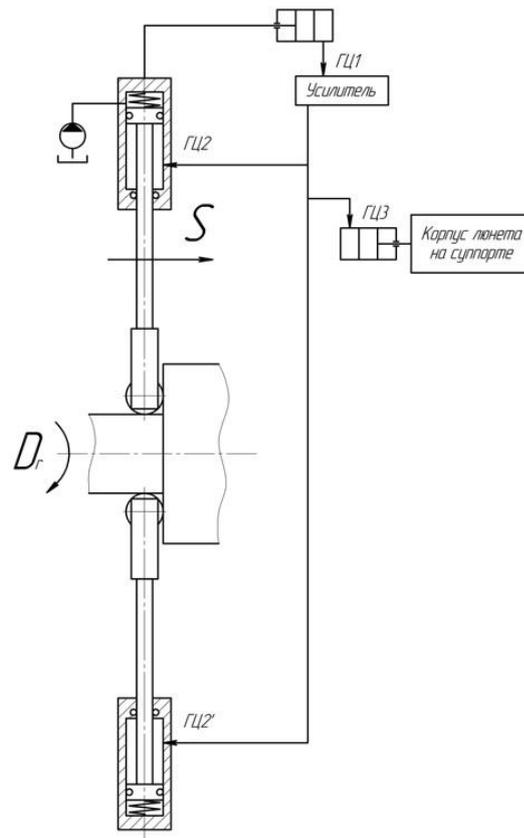


Рис. 2. Принципиальная гидромеханическая схема устройства.

Принцип действия системы перехода подвижного люнета осуществляется следующим образом:

1. Регистрация усилия в осевом направлении. (Повышение давления в ГЦ1)

2. Передача через гидроусилитель давления:

2.1 на ГЦ2, ГЦ2' и ГЦ2'' соответствующих стержней. Разжатие стержней

2.2 на ГЦ3 на суппорте для компенсации времени перехода. После завершения перехода люнет с ограниченной скоростью возвращается к исходному положению на суппорте.

Один из трех подвижных стержней люнета будет являться и измерительным преобразователем, два других отодвигаются и подвигаются в соответствии с первым. Первый стержень копирует поверхность детали, два других повторяют движение первого, вследствие чего люнет перенастраивается на следующую поверхность, что позволяет ему продолжить движение. Схема расположения стержней подвижного люнета показана на рис. 3.

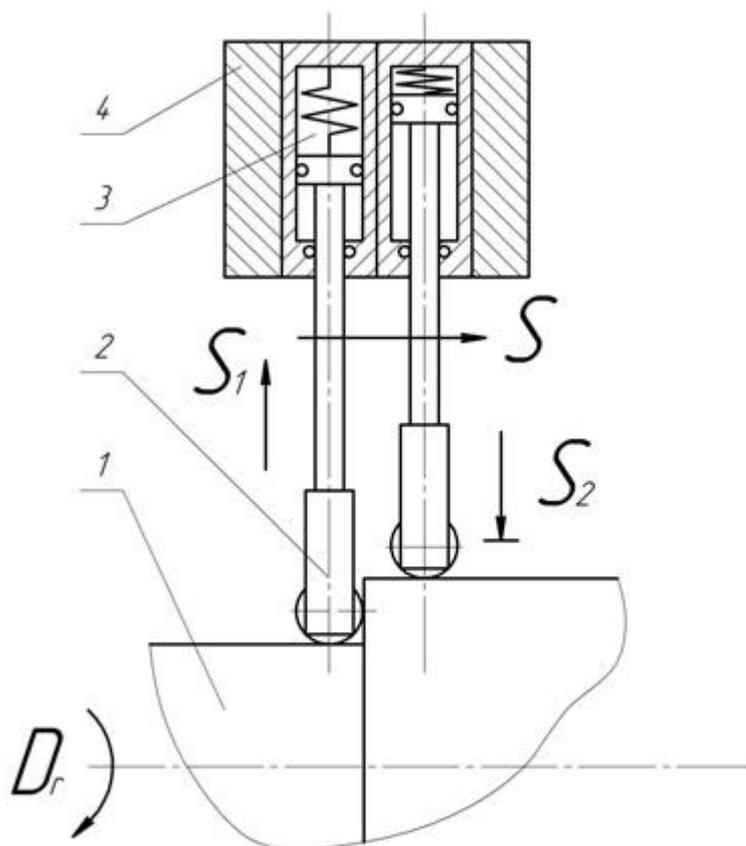


Рис. 3. Расположение стержней подвижного люнета: 1 – заготовка, 2 – подвижный стержень люнета, 3 – гидrocилиндр, 4 – корпус люнета.

Последовательность перехода стержней люнета с одной базирующей поверхности на другую осуществляется следующим образом. В данном случае возникает необходимость фиксации детали во время изменения диаметра базирования люнета. Это можно осуществить с помощью другой тройки стержней поставленных параллельно. Переход на новую базирующую поверхность состоит из нескольких этапов см. рис 4.

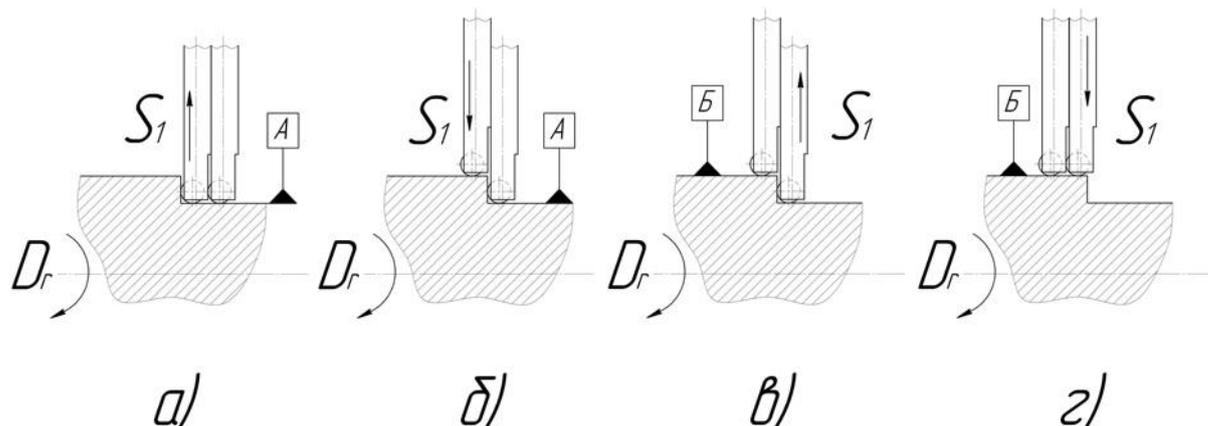


Рис. 4. Этапы перехода на новую базирующую поверхность:
а), б), в), г) – последовательность переходов.

На первом этапе (см. рис. 4а) осуществляется регистрация усилия в осевом направлении. Отвод первой тройки стержней до следующего размера диаметра. Вторая ступень неподвижна в радиальном направлении, и воспринимает динамические и статические нагрузки. На втором этапе (см. рис. 4б) происходит фиксация первой тройки стержней на диаметре. Восприятие нагрузок осуществляется обеими тройками стержней. На третьем этапе (см. рис. 4в) происходит регистрация усилия в осевом направлении. Отвод второй тройки стержней до следующего размера диаметра. Первая ступень неподвижна в радиальном направлении, и воспринимает динамические и статические нагрузки. На заключительном этапе (см. рис. 4г) осуществляется фиксация второй тройки стержней на диаметре. Восприятие нагрузок осуществляется обеими тройками стержней.

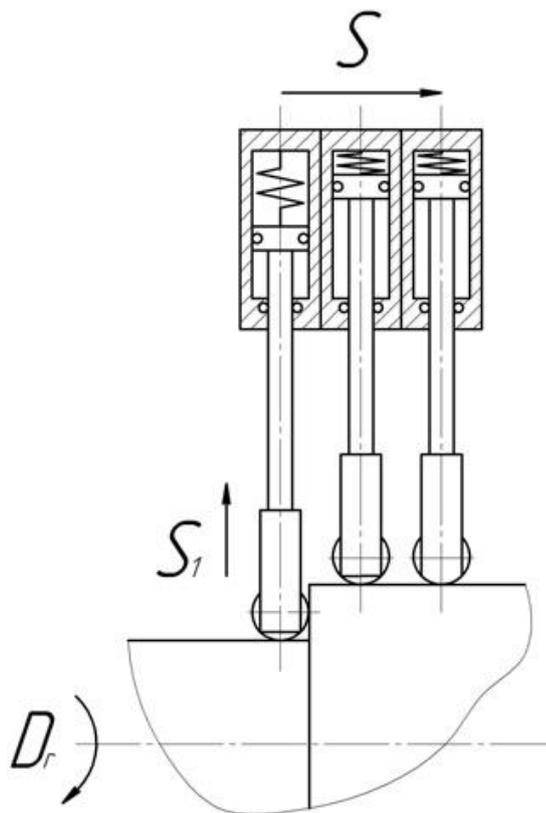


Рис. 5. Увеличение числа троек стержней.

Возможные коррективы конструкции и работы предлагаемого специального люнета:

1) Увеличение плавности хода, может быть достигнуто увеличением числа троек опорных стержней, см. рис. 5. В идеальном варианте предполагается проектирование сплошного массива троек. В данном случае необходима дифференциальная зависимость соседних троек в зависимости от их взаимного положения. К достоинствам можно отнести повышение точности позиционирования, повышение максимальной динамической нагрузки и увеличение плавности хода, однако это усложняет конструкцию, увеличивает время перехода через диаметр, а также увеличивает габариты люнета в осевом направлении.

2) Чувствительность, минимальный (максимальный) размер ступени перехода, необходимый для безусловного перехода по поверхности без потери базирования детали. В данном случае необходимо гарантировать базирование детали хотя бы одной тройкой стержней. Это достигается увеличением числа троек стержней или шага между ними.

3) Предельная динамическая нагрузка. В частных случаях базирования детали по одной тройке, необходимым условием является достаточная динамическая грузоподъемность одной тройки стержней. В случае нескольких троек стержней, одновременно базирующих деталь при переходе, возможно уменьшение динамической нагрузки, и соответственно эффективного сечения отдельного стержня, уменьшение его конструктивных размеров.

4) Диапазон диаметров и длин деталей. Регулируется шириной стержней в пакете, общей длиной пакета. При переходе к торцу детали и удерживающему ее патрону или заднему центру соответствующие стержни отодвигаются на длину максимального хода.

5) Добавление измерительного преобразователя (ИП) для регистрации перехода диаметра в качестве независимого элемента см. рис. 6. К достоинствам можно отнести

повышение точности регистрации переходов и разделение измерительной, а также силовой систем. Недостатком же является незначительное усложнение конструкции.

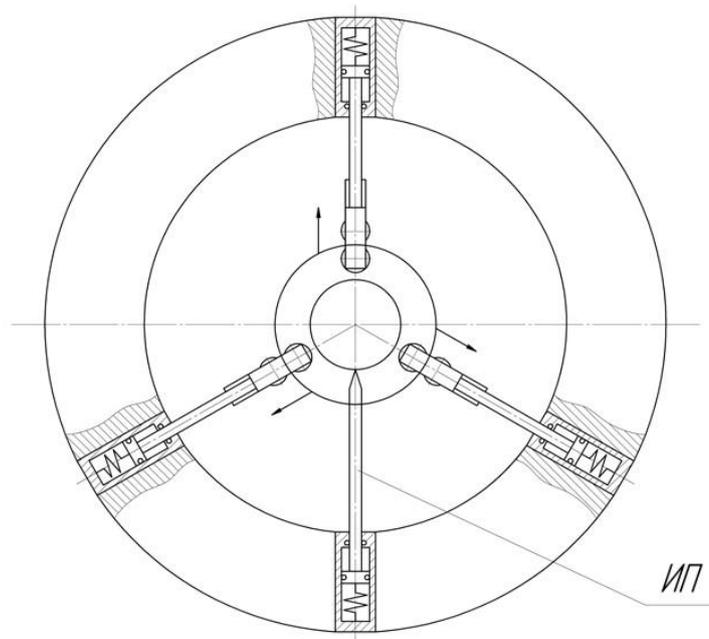


Рис. 6. Добавление измерительного преобразователя для регистрации перехода диаметра.

С использованием подвижного люнета данной конструкции возникают ограничения по перемещению суппорта и, соответственно, режущего инструмента в момент непосредственного перехода люнета на следующую поверхность базирования, вследствие чего обработка на это время прекращается, что увеличивает затраты по технологическому времени. Соответственно, данная конструкция может быть нецелесообразна в случае большого количества ступеней диаметра, либо в случае, когда разность двух последовательных диаметров значительна по сравнению с данной обрабатываемой поверхностью. Однако в первом случае проблема компенсируется высокой скоростью реагирования и исполнения гидравлической системы, управляющей лишь стержнями люнета, а не суппортом в целом. Второй случай представляется маловероятным вследствие того, что люнет изначально необходим для обработки длинномерных деталей, и переходы размеров подобного рода технологически нецелесообразно обрабатывать на токарных станках.

Литература

1. Б. Н. Вардашкин, А. А. Шатилова, Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т. – М. : Машиностроение, 1984. – Т.1 , 1984. 592 с., ил.
2. Вардашкин, В. В. Данилевский, Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т. / Ред. Совет: Б. Н. Вардашкин (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1984. – Т.2, 1984. 656 с., ил.
3. Я. Н. Отений, Н. И. Никифоров, А. И. Журавлев, «Комбинированная обработка длинных валов» // СТИН. – 2006. - №6. – С.36 -38.

УДК 621.09

ДИАГНОСТИКА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ПРОГРАММНЫМИ МЕТОДАМИ

Николай Валерьевич Терентьев, Егор Иванович Титков, Никита Евгеньевич Гострый

Студенты 4 курса

кафедра «Металлорежущие станки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Г. Ягопольский

старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»

Обеспечение высокой технологической надежности металлорежущих станков актуально для современного машиностроения. Конкурентоспособность продукции машиностроения во многом основывается на качестве и точности обработки деталей, непосредственно связанными с технологической надежностью металлорежущих станков. С развитием научно-технического прогресса, совершенствованием условий производства, повышением требований к качеству продукции и усложнению ее конструкции, встает вопрос обеспечения высокой технологической надежности металлорежущих станков, который на сегодняшний день является важной задачей машиностроения.

Погрешности механической обработки деталей складываются из ряда факторов, обусловленных конструкцией и состоянием машиностроительного оборудования, т.е. технологической надежностью оборудования, а также условиями производства, квалификацией обслуживающего персонала и пр. Так в балансе суммарной погрешности обработки цилиндрической поверхности доля составляющих, связанных с состоянием суппортного узла, достигает порядка 25%. Машиностроительное оборудование, в том числе металлорежущие станки, должны в течении длительного промежутка времени сохранять заложенную надежность основных узлов и механизмов станка.

В процессе эксплуатации станка, особенно в условиях автоматизированного производства, при изготовлении больших партий деталей возникает необходимость оценить его уровень надежности по показателям качества обработки деталей. Для такой оценки необходимо пользоваться апробированной и отработанной унифицированной методикой. Однако, недостаток или отсутствие исследований и отработанных методик, в которых в комплексе осуществляется диагностирование и прогнозирование технологической надежности станка по параметрам траектории движения формообразующих узлов, к которым относится и суппортной узел делает эту проблему актуальной.

Применяемые в настоящее время методы диагностирования станков и прогнозирования их технологической надежности обладают рядом недостатков и ограничений:

1. Обособленность существующих видов испытаний;
2. Отсутствие общепризнанного представления о выходных параметрах станка;
3. Отсутствие надежных методик учета стохастического характера явлений, при работе станка;
4. Недостаточная разработанность тестовых методов диагностирования;
5. Недостаточное использование возможностей современной вычислительной техники.

Вышесказанное делает существующие методы малоприменимыми для решения современных задач обеспечения качества изделий.

Метод программных испытаний, основы которого были заложены профессором А. С. Прониковым, позволяет оценивать сопротивляемость станка спектру внешних воздействий, определять параметры его качества и надежности. Особенности данного метода заключаются в отказе от суперпозиционного подхода к процессу испытаний, применению программной

автоматизации нагружения станка, ориентации на использование современной вычислительной техники и информационных технологий. Важнейшим направлением по развитию и совершенствованию этого метода является создание методического и информационного обеспечения диагностирования и прогнозирования технологической надежности станков на основе параметров траектории перемещения формообразующих узлов, к которым относится и суппортный узел станка.

Диагностика параметров траекторий перемещения суппортного узла осуществляемая с помощью метода программных испытаний позволит более достоверно получать информацию о текущем состоянии станка, прогнозировать его технологическую надежность и вносить коррективы в технологические задачи или проводить необходимые ремонтно – профилактические мероприятия. Это обеспечит уровень технологической надежности станка, необходимый для достижения заданного качества изделий.

Как было сказано выше для развития и совершенствования метода программных испытаний станков необходима разработка способов и средств программного экспресс-диагностирования станков в сочетании с методическим, информационным и программным обеспечением, что позволяет использовать диагностическую информацию для принятия необходимых конструкторско-технологических решений, а также для управления качеством обработки в целях его повышения.

Разработка методики прогнозирования технологической надежности станка и связанные с этим исследования необходимо проводить по нескольким направлениям:

1. Прогнозирование потери точности станка в следствии износа направляющих и других узлов и механизмов станка;
2. Исследование влияния теплового режима станка на его параметрическую (технологическую) надежность;
3. Разработка общей методики прогнозирования технологической надежности станков различных групп и типов.

Основой становления и совершенствования метода программных испытаний станков является прогнозирование, осуществляемое на базе имитационного моделирования.

На рис. 1 приведена концепция метода программных испытаний, реализуемая с помощью комплекса экспресс-диагностики, которая может быть взята за основу при испытании технологического оборудования, в частности металлорежущих станков.



Рис 1. Комплекс экспресс-диагностика.

Программные испытания имеют наибольший эффект, если:

1. Их объем позволяет применять статистические методы оценки выходных параметров станка;
2. Они включают в себя прогнозирование возможного изменения выходных параметров во времени с использованием всех видов доступной информации;
3. В их процессе применяют методы диагностирования для оценки причин влияющих на выходные параметры станка;
4. Оптимизируются выходные параметры станка определяющие его технические характеристики.

При оценке качества и параметрической надежности станка используется набор унифицированных выходных параметров, которые для разных технологических машин (станков) могут иметь разный физический смысл, но одинаковое математическое описание [1]. Выходные параметры станка – это числовые показатели технических характеристик станка, определяющие его состояние и возможности выполнения заданных функций, т.е. характеристики по которым определяется качество изделия. Выходными параметрами могут быть:

1. точность функционирования станка;
2. диагностические характеристики станка;
3. кинематические характеристики станка;
4. экономические показатели.

Создание такого набора унифицированных параметров базируется на методике получения сведений о выходных параметрах из данной технической характеристики. Например: функции времени $X(t)$, где t – длительность цикла работы станка; функции пути $X(l)$, где l – величина перемещения рабочих органов станка и пр. Основой расчета показателей качества и надежности является модель параметрического отказа, отражающая изменение выходного параметра станка под действием различных факторов [1,2].

В общем виде каждую техническую характеристику станка можно представить как траекторию (функцию) некоторого показателя X_i в пространстве или времени, или как функцию специального показателя $X=F(q)$; числовые характеристики этой траектории (функции) и будут являться выходными параметрами станка (рис. 2).



Рис. 2. Выходные параметры станка, как числовые показатели его технических характеристик. Функциями, выражающими данные зависимости, могут быть:

1. Траектории перемещения рабочих и формообразующих органов станка, определяющие точность функционирования или другие показатели работоспособности;
2. Смещения (линейные, угловые) отдельных элементов станка в результате силовых или тепловых деформаций, включая воздействия от вибрационных процессов;
3. Временные зависимости для сил, давлений, крутящих моментов, передаваемой мощности и других характеристик динамической нагруженности системы;
4. Кинематические параметры станка (скорость, частота вращения, ускорение) и их изменение в течение цикла;
5. Изменение в процессе функционирования станка показателей его эффективности (производительность, КПД, температура и др.);
6. Уровень и характер любых установленных показателей (шум, специальные характеристики и т.д.).

При определении выходных параметров на основе анализа реализаций данной технической характеристики $F(q)$ необходимо учитывать, что могут оцениваться как макропоказатели, так и отдельные участки и микропоказатели. Это связано с состоянием станка, его статическими и динамическими характеристиками, быстропротекающими процессами и влиянием процессов средней скорости. Комплекс этих выходных параметров и их численные значения определяют начальный уровень надежности станка. С течением времени каждый параметр может изменяться в результате процесса старения станка, и в этом случае характеристика $F(q)$ также изменяется.

Для обеспечения параметрической (технологической) надежности станка необходимо знать и оценивать значения, которые может принимать каждый из выходных параметров, и его возможные изменения в процессе длительной работы станка. При этом следует учитывать, что каждый из параметров X_i проявляется как случайная величина со своим законом распределения, поскольку станок работает при различных режимах, нагрузках, скоростях и переменных условиях эксплуатации.

В результате оценки качества и надежности должно быть получено заключение о состоянии станка, в котором указывается, при каких условиях эксплуатации достигаются заданные параметры станка, а также в течение какого времени эксплуатации и с какой вероятностью эти показатели будут сохраняться. Также в результате испытания и прогнозирования должны быть получены характеристики качества и параметрической (технологической) надежности, приведенные ниже.

1. Численные характеристики областей состояний, т.е. области, в которых с заданной вероятностью находятся регламентируемые выходные параметры станка.
2. Запас надежности для каждого из выходных параметров, т.е. отношение допустимых значений, определяющих область работоспособности, к их фактическим значениям, определяющим область состояний.
3. Ресурс по параметру при заданной вероятности безотказной работы станка или вероятность безотказной работы в течение заданного промежутка времени при регламентированной продолжительности сохранения станком работоспособности, т.е. ресурс до среднего или капитального ремонта.

Литература

1. *Проников А.С.* Программный метод испытания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1985. – 288 с.
2. *Проников А.С.* Параметрическая надежность машин. – М.: Знание, 1976. - 46 с.
3. *Васильев Г.Н., Ягопольский А.Г., Трмасов А.П.* Проблемы диагностики и обеспечение надежности металлорежущих станков // СТИН. – 2003. – №7. – С.14 – 17.

4. Ягопольский А.Г., Тремасов А.П. Современные методы диагностики и контроля для обеспечения технологической надежности станков // Состояние и проблемы измерений: Тез. докл. 8 – й Всероссийской научн. – техн. Конф. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – С.86–87.

УДК 53.084.823

ПРИНЦИП «ЛЕГО-ИНЖИНИРИНГ» В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Анна Михайловна Урядышева

Студент 2 курса

кафедра «Мехатронные системы и процессы формообразования имени С. С. Силина»

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева

Научный руководитель: В. В. Михрютин

кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатронные системы и процессы формообразования имени С. С. Силина»

В современном машиностроении первоочередным требованием становится снижение времени, затрачиваемого на проектирование и технологическую подготовку выпуска изделия. Для отрасли станкостроения время производства станка является ключевым фактором [1]. Это связано с тем, что предприятия, нуждающиеся в станках, стремятся приобретать только новое и совершенное оборудование в минимальные сроки поставки.

Станкостроители стремятся создавать серии станков универсального назначения и налаживать каналы их продаж. Однако при этом трудно предугадать реальные потребности рынка и создать станок, отвечающий противоречивым требованиям различных заказчиков. Поэтому на практике создание станков универсального назначения связано с экономическими рисками и оправданной становится разработка станка под конкретные требования заказчика. При этом производитель станка запрашивает у заказчика детализированное техническое задание на станок. На начальной стадии разработки концепции станка конструктор имеет возможность разрабатывать альтернативные решения и выбирать из них наилучшие. Генерация, сравнение и выбор вариантов конструкции обычно приводят к созданию инновационных решений, снижающих стоимость проекта и повышающих эксплуатационные характеристики оборудования. Корректирование проекта на поздних стадиях проектирования имеет высокую трудоемкость и обходится очень дорого. Поскольку современный станок с ЧПУ является сложным мехатронным устройством, объединяющем в себе механическую, электронную и программную составляющие, современным конструкторам требуются средства проектирования, позволяющие разрабатывать весь комплекс составляющих его элементов с учетом их взаимодействия.

Это требует пересмотра подходов к разработке станков и внедрение методов автоматизированного проектирования оборудования. При этом вопросы, связанные с анализом конструкции несущей системы, приводов главного движения и подач, выбора различных вариантов оснастки, технологичности конструкции и эргономичности должны рассматриваться и решаться не последовательно, а параллельно.

Ускорить производство станка позволяет использование модульной конструкции и нормализованных элементов сторонних производителей. При этом однажды разработанные модули станка, можно использовать в разных конструкциях и совершенствовать из года в год. Данная концепция построения модели станка получила наименование «лего-инжиниринг».

Введение в проектирование машин модульности приводит к ускоренную разработку новых машин и обеспечение высокого качества инжиниринговых услуг. Переход промышленности к конструированию, производству и техническому сервисному обслуживанию продукции, собранной из модулей – стандартизированных технологических блоков, начался достаточно давно. Еще в XIX веке получили распространение конструкции из стандартизированных деталей в строительстве, что способствовало переходу к сборке домов с использованием типовых изготовленных в заводских условиях стальных конструкций. До начала XX-го века промышленность последовательно двигалась к использованию модульных конструкций, осваивая технологии интеграции в производство стандартизированных и заменяемых технологических узлов. Процесс распространения модульной архитектуры связан с тем, что в производстве, базирующемся на зрелых технологиях, использование модульных конструкций обеспечивает существенный выигрыш в гибкости этого производства и его экономической эффективности.

В настоящее время рядом производителей налажено производство нормализованных элементов конструкции станков – линейных направляющих, элементов передач винт-гайка качения, а также деталей и узлов пневмооборудования. Станкостроительные компании закупают готовые узлы и полностью отказываются, например, от изготовления деталей передач винт-гайка; взамен направляющих скольжения применяют покупные LM-направляющие. Производители создают библиотеки-генераторы трехмерных моделей своего оборудования, позволяющие использовать их при проектировании станка. Подобные программы выпускаются также для генерации моделей электродвигателей, элементов электроавтоматики, систем управления и элементов их крепления.

Ряд компаний выпускает унифицированные поворотные столы, револьверные головки и шпиндель-моторы, используемые в конструкции самых разнообразных станков.

Необходимость построения компоновки станка в соответствии с требованиями заказчика для производства деталей определенной разновидности привели к созданию концепции модульного построения конструкции станка из унифицированных рабочих органов. Это достигается использованием станин, шпиндельных узлов, столов, шпиндельных бабок в конструкциях станков различных типов.

Например, компания Starraghekkert производит станины, колонны, шпиндельные бабки и шпиндельные узлы различных типоразмеров Собирая их и устройства смены палет в различных сочетаниях возможно получить широкую гамму станков для обработки деталей различных габаритов.

Компания INDEX-Werke выпускает набор конструктивных элементов, соединяя которые можно построить токарные и сверлильно- фрезерно-расточные обрабатывающие центры с различным числом координатных движений в зависимости от конкретных требований заказчика.

В курсовом и дипломном проектировании РГАТУ имени П.А. Соловьева в учебном процессе обучение устройству современных станков производится параллельно с освоением программ-генераторов трехмерных моделей стандартных компонентов, но первоначально производится знакомство с основными элементами станка. Это производится в курсе лабораторных работ при непосредственном ознакомлении с реальными конструкциями, а также с использованием специального программного обеспечения.

Например, используется компьютерная обучающая программа VirtualMachine, выпущенная компанией Siemens [2], которая знакомит с устройством, основами работы и программирования токарного и фрезерного станков, оснащенных системами управления Sinumerik 802CS и Sinumerik 840D. Окно программы, демонстрирующее работу передачи винт-гайка качения показано на рис. 1.

Виртуальный станок можно разбирать, снимая кожухи и отдельные узлы, изучать описание того или иного устройства. При этом предлагается описание, знакомящее как с

конструкцией в целом, так и с основными узлами станка. Описание чаще всего также снабжается анимацией, наглядно демонстрирующей работу устройства.

При выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ используются ряд программ [3], позволяющих существенно снизить трудоемкость разработки конструкций и создания трехмерных моделей.

Для примера можно привести каталоги компонентов японских компаний THK, IKO; германских Bosh Rexroth, INA. Чешский производитель передач винт-гайка качения KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM предлагает библиотеки шариковых гаек в формате IGES.

Для примера на рис. 2 показана модель линейной оси, построенная из компонентов библиотеки-генератора компании THK Co.

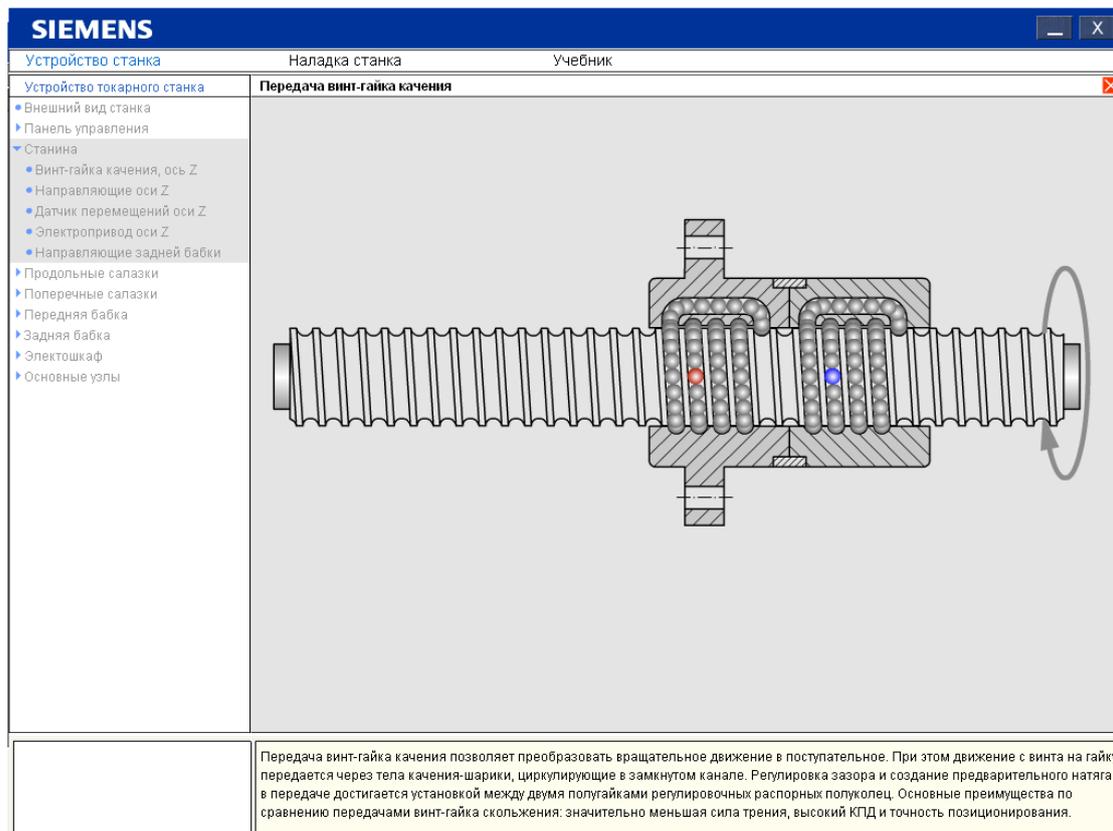


Рис. 1. Обучающая программа Siemens VirtualMachine [2].

На рис. 3 представлена сборка пульта управления станком с креплением. При этом геометрические модели пульта оператора и станочного пульта созданы с использованием программного обеспечения Siemens CAD Creator, а компоненты кронштейна – программного обеспечения компании Rittal GmbH. Программное обеспечение Rittal позволяет также создавать трехмерные модели электрошкафов и необходимого оборудования для их кондиционирования. Положительной стороной данного программного обеспечения является также возможность расчета тепломассобмена потоков воздуха в электрошкафу, обеспечивающих необходимый режим охлаждения электронных блоков приводов.

Элементы пневматики могут создаваться с использованием программных систем, создающих компоненты, производимые компаниями Camozzi и Bosch Rexroth AG. Bosch Rexroth AG выпускает бесплатную программу D&C Scheme Editor, позволяющую создавать пневматические схемы.

Пример конструкции пневматического привода тактового стола устройства смены шлифовальных кругов, созданный с использованием программы-генератора Camozzi показан на рис. 4.

Siemens AG предлагает при создании интегрированных систем управления с приводами главного движения и подачи станка использовать программу Sizer for Siemens Drives, позволяющую на основе заданных пользователем циклограмм нагружения детально подобрать компоненты электроприводов вплоть до соединительных кабелей, а затем создать трехмерные модели всех выбранных компонентов, необходимых для проектирования приводов подачи и электрошкафов.

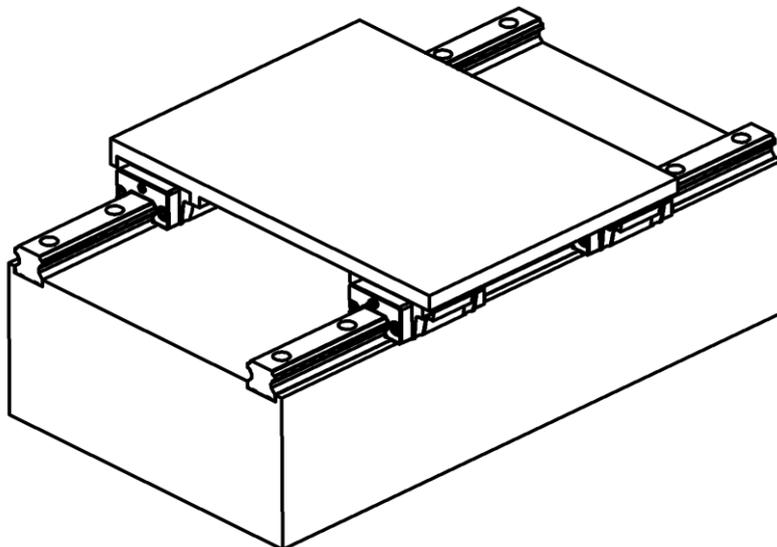


Рис. 2. Модель линейной оси, построенная из библиотечных компонентов.

Достоинством использования программ-генераторов трехмерных узлов является также создание детального списка всех необходимых для заказа компонентов.

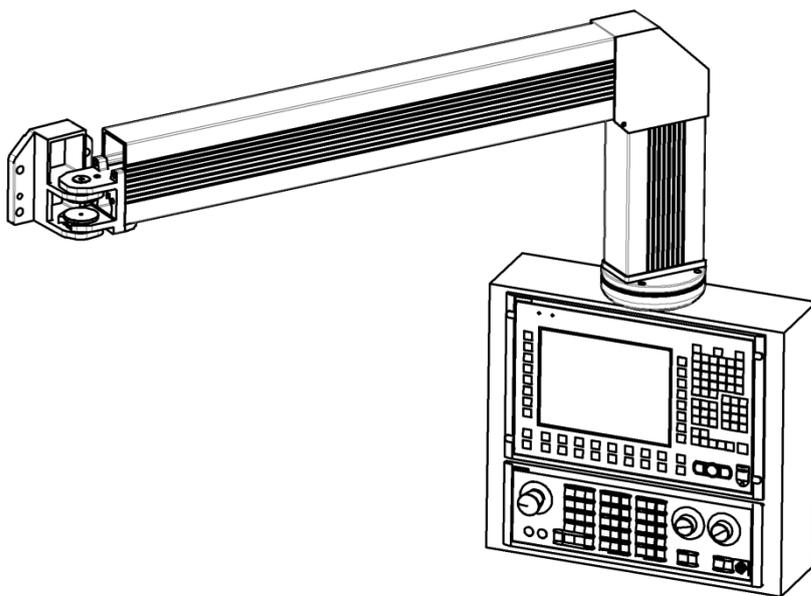


Рис. 3. Сборка пульта управления, построенная из библиотечных компонентов.

Концепция «лего-инжиниринга» используется для создания 3D модели станка и его основных компонентов, которые, однако, она не учитывает динамические и прочностные свойства машины. Такие расчеты производятся средствами программ инженерного анализа конструкций. Так как заказчик может потребовать машины разных вариантов конструкции, база данных продукта должна содержать большое количество разных решений для продукта

(модулей). Выбор правильных компонентов и использование новейших технологий остается центральным звеном для оптимизации производства.

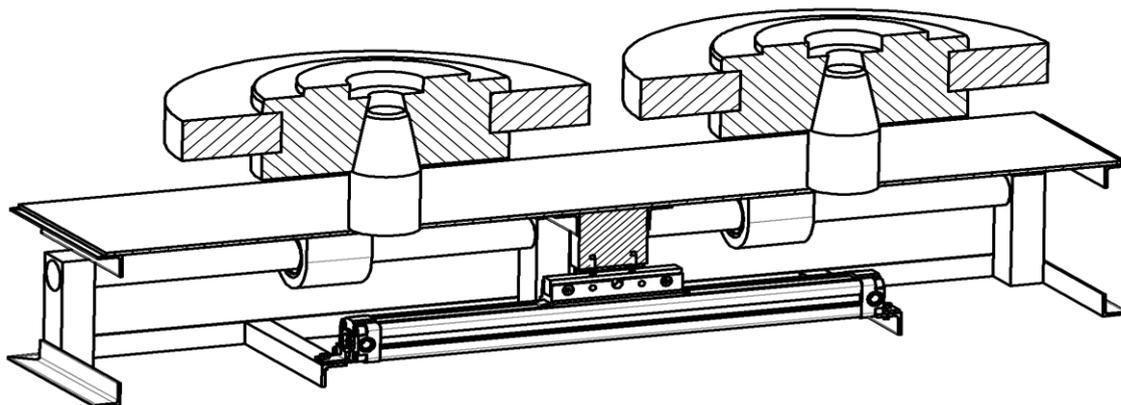


Рис. 4. Сборка тактового стола, построенная из библиотечных компонентов.

Производители должны искать новые возможности организации рабочего процесса, чтобы ускорить их доставку потребителю. Сложность интеграции механической, электронной частей машины, отладка программного обеспечения и другие подсистемы часто препятствуют времени выхода на рынок. Разработка методов, которое позволяет тесное сотрудничество между различными инженерами дисциплинами повышает эффективность инженерных ресурсов. Это делает необходимым внедрения в процесс проектирования станков концепций управления жизненным циклом изделий.

Литература

1. Mechatronic Development for Machine Tools// http://m.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/ARC_Whitepaper_Mechatronic_tcm1224-104609.pdf
2. Мухрятин В. В., Мухрятина А.В. VirtualMachine — программный продукт для обучения устройству и программированию станков с ЧПУ//САПР и графика 2009. № 9. с. 115 – 118.
3. Мухрятин В. В., Мухрятина А. В. Курсовое проектирование станков с использованием системы трехмерного моделирования// ВКИТ №9 2010 С. 21 – 27.
4. Мухрятин В. В., Шерстобитов М. А. Программные средства проектирования автоматизированных станков [Текст] // Оборудование и инструмент для профессионалов № 5, 2009. – С. 18 – 20.

УДК 621.01

РАЗРАБОТКА ТИПОВОГО РАСЧЕТА ОПТИМИЗАЦИИ КООРДИНАТ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ

Цзи Шоучэн

Аспирант 2 года

кафедра «Металлорежущие станки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: П.М. Чернянский

доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки»

Ключевые слова: *точность (precision), давление (pressure), оптимизация (optimization).*

Аннотация: Точность системы позиционирования (СП) является одной из наиболее показательных характеристик металлорежущих станков, позволяющих оценить точность обрабатываемых на нем деталей. **Цель данного исследования** – по методике оптимизации эпюры давления направляющих многоцелевых станков повысить точность СП и обработки.

Расчет прямолинейных направляющих можно представить как статически определимую задачу, допуская, что эпюра давлений ограничена прямой или плоскостью [4, 6]. Возможны 2 варианта эпюры давления: а – равномерное давление $\rho_1 = \rho_2$; вариант б – неравномерное давление $\rho_1 \neq \rho_2$ (рис. 1).

Контактные смещения y и давления связаны экспериментально установленными зависимостями, полученными для плоских стыков с малой площадью контакта:

$$y = c\rho^m \quad (1)$$

где c и m – коэффициенты, зависящие от материала, шероховатости (микрорельефа), методов обработки и состояния контактных поверхностей.

По уравнению (1) получим смещения y и погрешность Δ для грани:

1) вариант 1:

$$y_{11} = c\rho_{11}^m, y_{12} = c\rho_{12}^m, \rho_{11} = \rho_{12};$$

$$\Delta_1 = |y_{11} - y_{12}| = 0;$$

2) вариант 2:

$$y_{21} = c\rho_{21}^m, y_{22} = c\rho_{22}^m, \rho_{21} \neq \rho_{22};$$

$$\Delta_2 = |y_{21} - y_{22}| = |c\rho_{21}^m - c\rho_{22}^m| > 0.$$

Из анализа двух вариантов следует, что при равномерном давлении погрешность в направляющих СП равна нулю и минимальна.

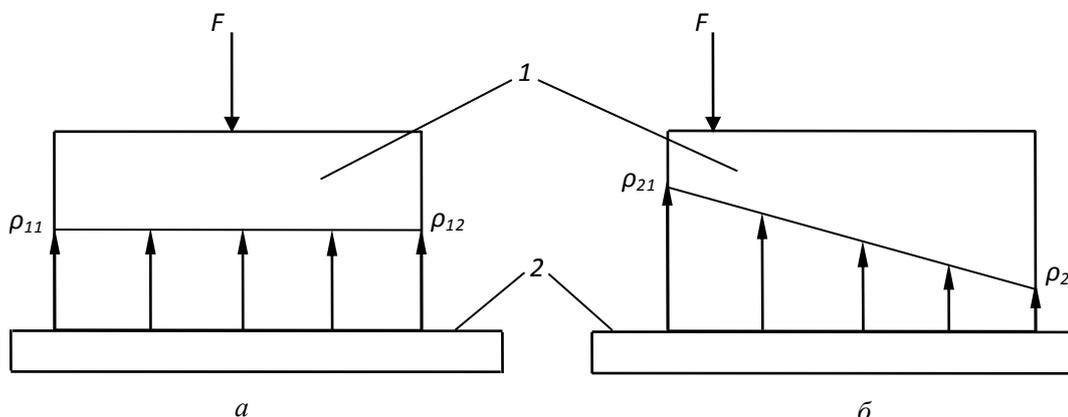


Рис. 1. Эпюры давления направляющих:

а – равномерное; б – неравномерное; 1 – салазки, 2 – направляющие.

Для расчета давлений в направляющих внешние силы и моменты приравниваются. На рис. 2 по длине направляющих 1 выделена область расположения салазок 1 на прямолинейных направляющих 2. Начало координат совмещено с одним из углов салазок. На схеме приведены необходимые для расчета размеры, сосредоточенная сила F_z , сила веса G , моменты M_x , M_y .

В результате расчета определяем давления на опорной поверхности:

1) при $x=0, y=0$:

$$\rho_1 = D = \frac{1}{l} \left[\frac{\sum F_z}{d} \left(4 + \frac{3N^2}{Q} \right) - \frac{6 \sum M_x}{dl} - \frac{6N \sum M_y}{Q} \right], \quad (2)$$

2) при $x=c, y=0$:

$$\rho_2 = Ac + D = \frac{12dc}{Ql} \left(-\frac{N \sum F_z}{2d} + \sum M_y \right) + \rho_1, \quad (3)$$

3) при $x=0, y=l$:

$$\rho_3 = Bl + D = \frac{12}{dl} \left(-\frac{\sum F_z}{2} + \frac{\sum M_x}{l} \right) + \rho_1, \quad (4)$$

4) при $x=c, y=l$:

$$\rho_4 = \rho_2 + \rho_3 - \rho_1. \quad (5)$$

где: $\sum F_z$ – Сумма проекций внешних сил ,спроектированных на ось z ; $\sum M_x$ – Сумма моментов внешних сил относительно оси Ox ; $\sum M_y$ – Сумма моментов внешних сил относительно оси Oy . И обозначим:

$$d = a + b; N = a^2 - b^2 + 2bc; M = a^3 + b^3 + 3bc(c - b); Q = 4M(a + b) - 3N^2.$$

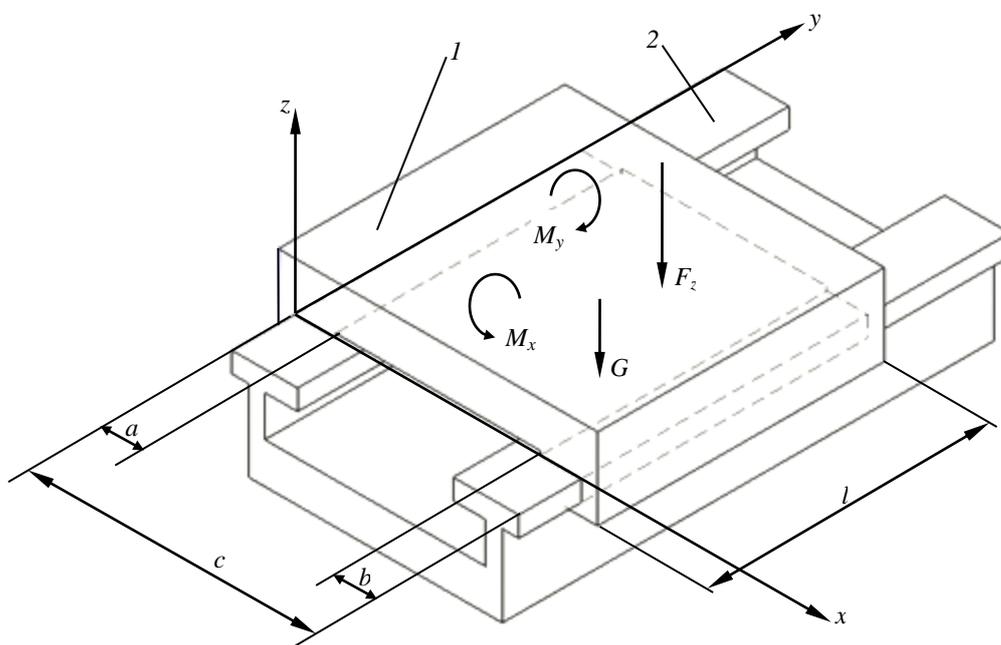


Рис. 2. Схема расчета направляющих прямолинейного движения:

1 – салазки; 2 – прямолинейные направляющие.

А. При малой ширине опорных поверхностей (узких направляющих), давление по ширине можно принять постоянным, и расчет упростится.

Учитывая также, что:

$$\sum M_y = F_z \cdot \frac{a}{2},$$

$$\sum M_x = F_z \cdot y_z,$$

$$x = c = a = \text{const}, b = 0; d = a, N = a^2, M = a^3, Q = a^4,$$

где y_z – координата силы F_z по оси oy .

Подставив полученные данные в формулы (2) – (5), получим уравнения для расчета давления узких направляющих:

для $y=0$:

$$\rho_0 = \frac{\sum F_z}{al} (4 - 6\alpha);$$

для $y=l$:

$$\rho_l = \frac{\sum F_z}{al} (-2 + 6\alpha).$$

При $\sum F_z = F_z$ и сечая ее вдоль направляющих, можно рассчитать давления ρ_A в каждой точке направляющих под точкой приложения силы:

$$\rho_A = \frac{12F_z}{al} (\alpha^2 - \alpha + \frac{1}{3}), (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (6)$$

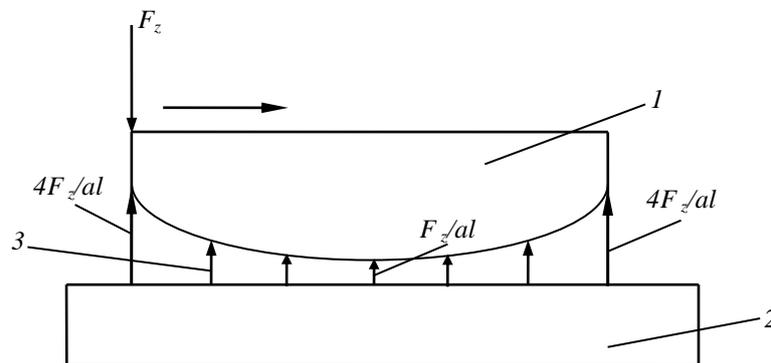


Рис. 3. Эпюра давления по длине направляющих при смещении точки приложения силы

1—салазки, 2 – направляющие, 3 – эпюра давления.

Принимая $\alpha = 0$ или $\alpha = 1$, находим: $\rho_{Amax} = 4F_{рез}/al$; принимая $\alpha = 0.5$, находим: $\rho_{Amin} = F_{рез}/al$. Получим эпюру давления по длине направляющих на рис. 3.

Б. Опорная поверхность непрерывна, но давление по длине и ширине ее принимается переменным. Следовательно, при принятых обозначениях по рис.1,

$$a = c, b = 0, d = a:$$

$$N = a^2, M = a^3, Q = a^4.$$

Тогда расчетные формулы (5) - (8) примут вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 = \frac{1}{al} \left(7 \sum F_z - \frac{6 \sum M_x}{l} - \frac{6 \sum M_y}{a} \right) \\ \rho_2 = \frac{1}{al} \left(\sum F_z - \frac{6 \sum M_x}{l} + \frac{6 \sum M_y}{a} \right) \\ \rho_3 = \frac{1}{al} \left(\sum F_z + \frac{6 \sum M_x}{l} - \frac{6 \sum M_y}{a} \right) \\ \rho_4 = \frac{1}{al} \left(-5 \sum F_z + \frac{6 \sum M_x}{l} + \frac{6 \sum M_y}{a} \right) \end{array} \right.$$

Для упрощения расчетов принимаем, $\sum F_z = F$:

$$\sum M_x = F \cdot y, 0 \leq y \leq l;$$

$$\sum M_y = F \cdot x, 0 \leq x \leq a;$$

где x, y – координаты силы резания.

Так можно рассчитать давление в каждой точке направляющих от силы резания:

$$\rho_B = \frac{12F}{al} \left[\frac{(x-a/2)^2}{a^2} + \frac{(y-l/2)^2}{l^2} + 1 \right] \quad (7)$$

Принимая $x=0$ или $x=a$, и $y=0$ или $y=l$, находим: $\rho_{Bmax} = 18F/al$; принимая $x=a$ или $x=c-a$, и $y=l/2$, находим: $\rho_{Bmin} = 12F/al$. Давления по опорной поверхности направляющих показана на Рис.4.

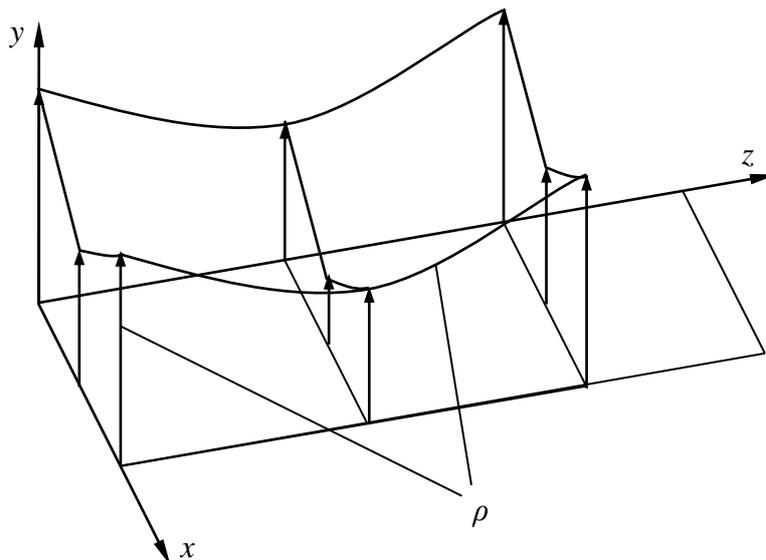


Рис. 4. Эпюра давления на опорной поверхности направляющих.

И погрешность направляющих СП Δ_B :

$$\Delta_B = c\rho_{Bmax}^m - c\rho_{Bmin}^m = c\left(\frac{18F}{al}\right)^m - c\left(\frac{12F}{al}\right)^m \quad (8)$$

Для определения оптимальных координат зоны резания можно изменять размеры салазок, величину и координаты приложенных сил, добиваясь выравнивания давления и повышение точности СП в станках.

В качестве примера приведем расчет прямоугольных направляющих токарного станка. Расчетная схема с указанием действующих сил и их координат приведена на рис. 5.

Для данной конструкции станка принимаем:

силы резания: $P_y = 3.5 \text{ KN}$, $P_z = 1.8 \text{ KN}$, $P_x = 0.8 \text{ KN}$;

вес суппорт с фартуком $G = 3.0 \text{ KN}$;

размеры направляющих: $a = b = 20 \text{ mm}$, $c = 120 \text{ mm}$, $l = 200 \text{ mm}$;

координаты силы резания: $z_p = 10 \text{ mm}$, $x_p = 100 \text{ mm}$, $y_p = 120 \text{ mm}$;

координаты тягового усилия: $z_Q = 50 \text{ mm}$, $x_Q = 180 \text{ mm}$, $y_Q = 50 \text{ mm}$;

координаты силы веса: $z_G = 100 \text{ mm}$, $x_G = 130 \text{ mm}$, $y_G = 30 \text{ mm}$.

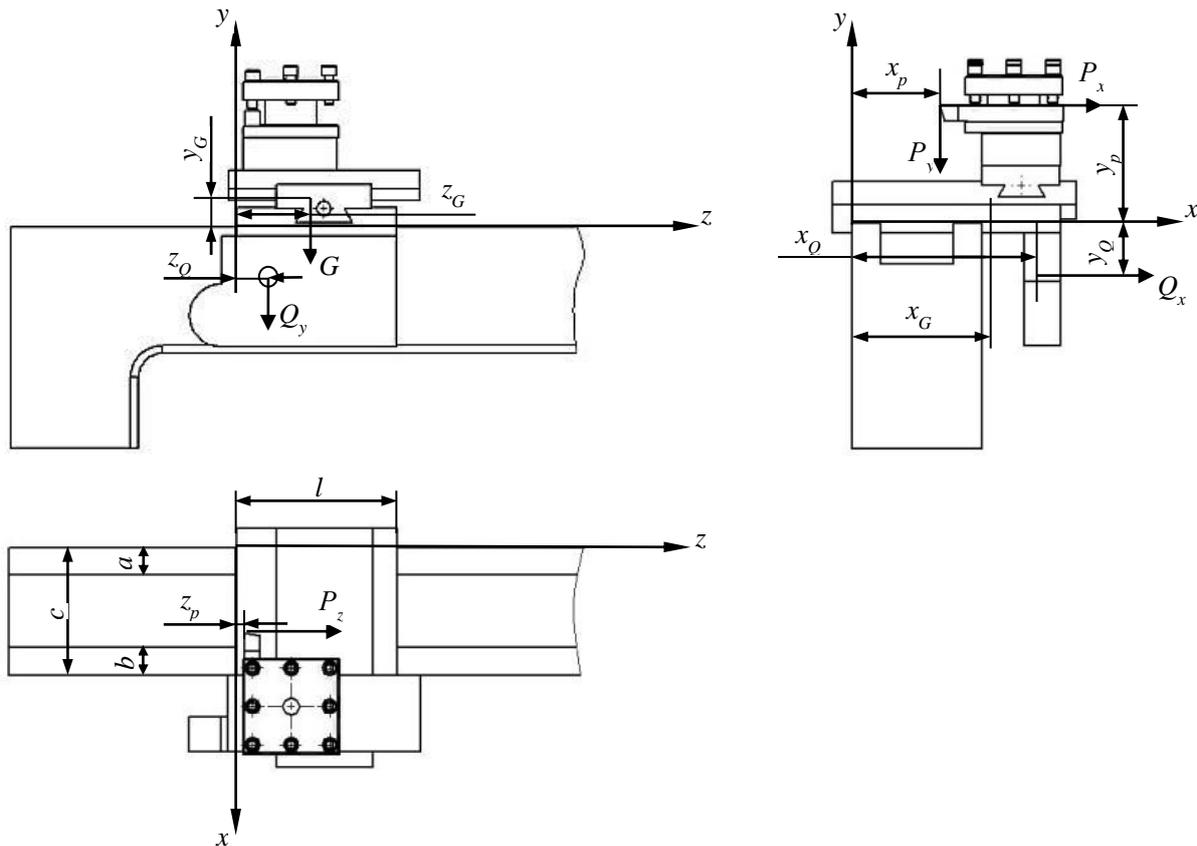


Рис. 5. Схема направляющих для расчета токарного станка.

Найдем форму давления направляющих станка для данных координат сил резания:

$$\rho = Ax + Bz + D = 0.0334x - 0.0057y - 0.05 \quad (9)$$

Для данного станка, по уравнению (4) получим эпюру давления направляющих станка, на рис. 6.

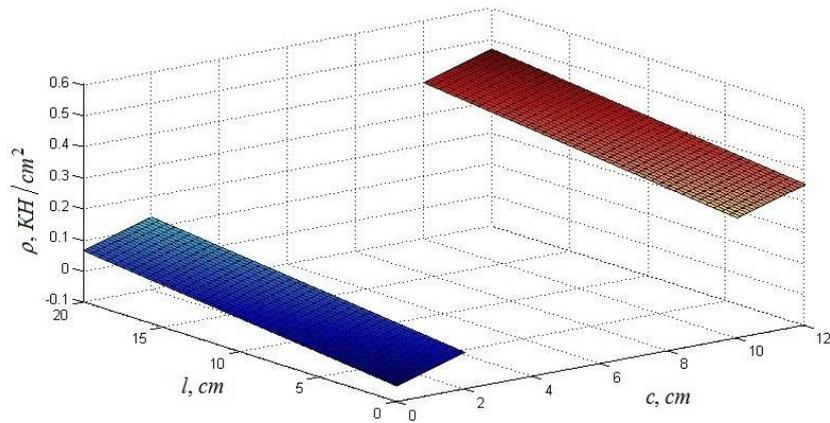


Рис. 6. Эпюра давления на поверхности направляющих станка.

Найдем форму эпюры давления в направляющих СП при смещении точки приложения сил резания по осям x и z :

$$\rho = Ax + Bz + D$$

$$= 1.727 \cdot 10^{-3} x^2 + 5.749 \cdot 10^{-3} x + 1.313 \cdot 10^{-3} z^2 - 2.008 \cdot 10^{-2} z + 0.0671 \quad (10)$$

Эпюра давления в направляющих СП показана на рис. 7.

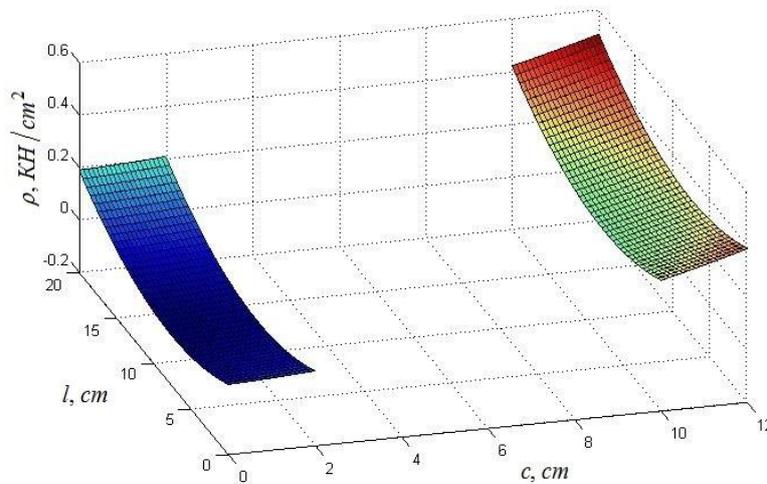


Рис. 7. Эпюра давления координат приложенных сил резания направляющих станка.

$$\rho_{\max} = 0.5082 \text{ KN/cm}^2 = 5.082 \text{ H/mm}^2, \quad (11)$$

$$\rho_{\min} = -0.0098 \text{ KN/cm}^2 = -0.098 \text{ H/mm}^2. \quad (12)$$

По рисункам 6 и 7 видно, что давление в направляющих неравномерно. Разница между максимальным и минимальными давлениями более 0.5 H/mm^2 . Для повышения точности направляющих СП станка изменим: 1) вектор сил резания ΣP , размер салазки и вектор силы веса:

силы резания: $P_z = 0.4 \text{ KN}$, $c = 220 \text{ mm}$, координаты сил резания и веса: $y_P = 35 \text{ mm}$, $z_G = 55 \text{ mm}$. Другие величины постоянны.

Эпюра давления в направляющих СП по расчету оптимизации показана на рис. 7.

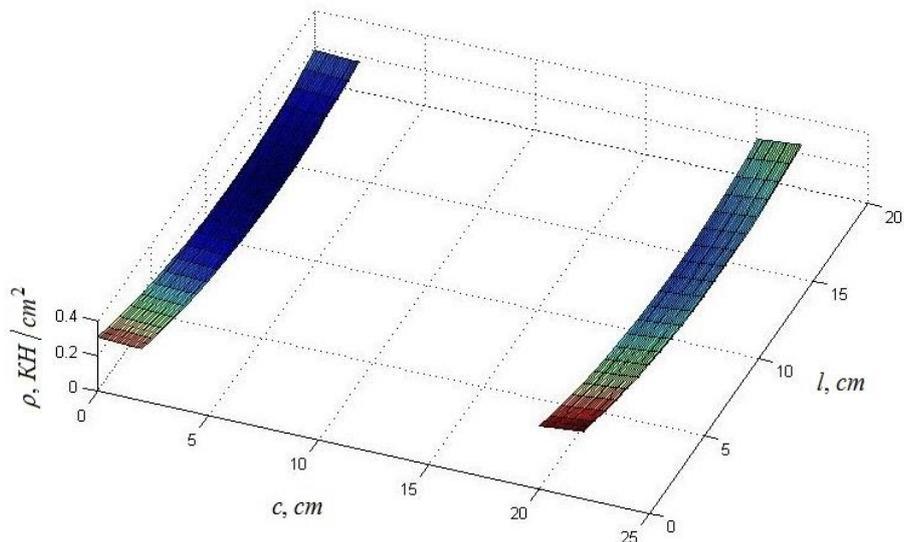


Рис. 7. Эпюра давления координат приложенных сил резания направляющих станка.

По результатам расчета оптимизации:

$$\rho_{\max.оп.} = 0.3798 \text{ КН/мм}^2 = 3.798 \text{ Н/мм}^2, \quad (13)$$

$$\rho_{\min.оп.} = 0.0799 \text{ КН/мм}^2 = 0.799 \text{ Н/мм}^2. \quad (14)$$

По уравнениям (11) – (14) получим, что разница максимального и минимального направляющих уменьшаются, что позволяет повысить точность обработки.

Вывод:

Изложенный расчет можно использовать для оптимизации координат зоны резания в станках, с целью повышения точности СП и обработки станков.

Литература

1. *Врагов Ю.Д.* Анализ компоновок металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.
2. *Ершов А.А.* Влияние контактных характеристик соединений корпусных деталей на показатели статической точности станков: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2001. 131 с.
3. *Левина З.М., Решетов Д.Н.* Контактная жесткость машин. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.
4. *Чернянский П.М.* Основы проектирования точных станков: теория и расчет. М.: КНОРУС, 2010. 240 с.
5. Проектирование автоматизированных станков и комплексов: в 2 т. Т. 1. / ред. *П.М. Чернянского*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 331 с.
6. *Цзи Шоучэн, Чернянский П.М.* Методика повышения точности системы позиционирования металлорежущих станков. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/750300.html> (дата обращения 12.12.2014).

УДК 658.51**ВЫБОР МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА ПРИ ЕГО ЗАМЕНЕ НА СУЩЕСТВУЮЩЕМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Евгения Алексеевна Чернова

*Студент 4 курса**кафедра «Металлообрабатывающие станки и комплексы»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: Б. М. Дмитриев**доктор технических наук, профессор кафедры «Металлообрабатывающие станки и комплексы»*

Вопрос выбора металлорежущих станков в первую очередь возникает при диверсификации производства, так как основу производства составляет полное использование технологического ресурса, конкурентная борьба на рынке машиностроения и безопасность от банкротства с получением максимальной прибыли. Также при проектировании технологических процессов механической обработки, одну из ведущих позиций занимает выбор металлорежущего станка.

Выбор оборудования и проведение приемо-сдаточных испытаний на предприятии-потребителе осуществляется инженерами-технологами. Для выбора оборудования существуют стандарты и инструкции предприятий, в которых сформулированы принципы выбора станков. Этот выбор основывается на анализе существующего оборудования по качественным показателям, таким как потребляемая мощность, требуемая точность, производительность, и т.д. В этом случае вероятность «удачного» выбора оборудования имеет достаточно низкий уровень, для того чтобы сузить или увеличить вероятность, требуется количественная оценка, как существующего, так и выбираемого оборудования. То же касается и приемо-сдаточных испытаний, для которых существуют стандарты и инструкции предприятий.

В связи с этим, целью настоящей работы является создание методики выбора металлорежущих станков с требуемыми свойствами, основанной на количественной оценке качества несущей системы станка.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих методик выбора металлорежущего оборудования.
2. Сформулировать требования к новому оборудованию, в соответствии с новыми требованиями производства.
3. Проанализировать существующие методики проведения приемо-сдаточных испытаний.

Для подтверждения необходимости методики были изучены и проанализированы существующие стандарты ГОСТ 16504-81, Р50-54-11-87, РД 50-532-85, ГОСТ 30741-2001, ГОСТ 7599-82, ГОСТ РВ 0015-002-2012, различные СТО и СТП, и методики проведения приемосдаточных испытаний на различных предприятиях механосборочного производства. Все эти методики основаны на определении качественных показателей, что лишает информацию достоверности в оценке свойств станка.

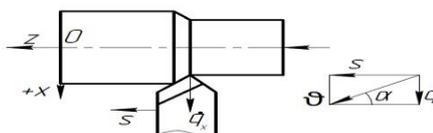


Рис. 1. Образование погрешности при токарной обработке.

Для того чтобы провести количественную оценку качества несущей системы, используем некоторый параметр χ , который в количественном отношении дает характеристику текущего уровня качества несущей системы станка [1]. Процесс преобразования энергии заготовки описывается двумя параметрами. Это скорость v и угол α (рис. 1).

Реализация этих двух параметров при обработке поверхности определённой протяжённости, формирует, на этой поверхности, некоторый слой металла, который составляет погрешность обработки. Образцовый станок, у которого уровень внутренней энергии обеспечивает удаление всего припуска без остатка, характеризуется объёмом снятого металла или площадью $W=S \times \tau \times t$ (рис 2).

Где τ – время обработки поверхности; t – глубина резания. Реальный станок производит работу по удалению стружки, но на обработанной поверхности остаётся слой не удалённого материала, в виде площади под $q(z)$:

$$W = \int_0^z q(z) dz.$$

Внутренняя энергия несущей системы выполняет работу равную разнице площадей $W-w$ [1]. Объём металла, оставшегося на обработанной поверхности и именуемый как погрешность, характеризует свойство несущей системы к преобразованию внутренней энергии несущей системы во внутреннюю энергию производимой детали.

Для определения качества несущей системы выбираемого станка используем формулу:

$$\chi = \frac{\int_0^z q(Z) dZ}{S \times \tau \times t}$$

где χ – показатель качества несущей системы станка,

τ – время обработки поверхности, t – глубина резания, S – подача [1]. Такая оценка позволяет достоверно определить свойства станка и сравнить станки одной модели, но разного конструктивного исполнения. Также данная оценка позволяет определить состояние станка после сборки на заводе-потребителе, сравнив его с оценкой количества качества на заводе-изготовителе. Это повышает обоснованность принимаемых решений.

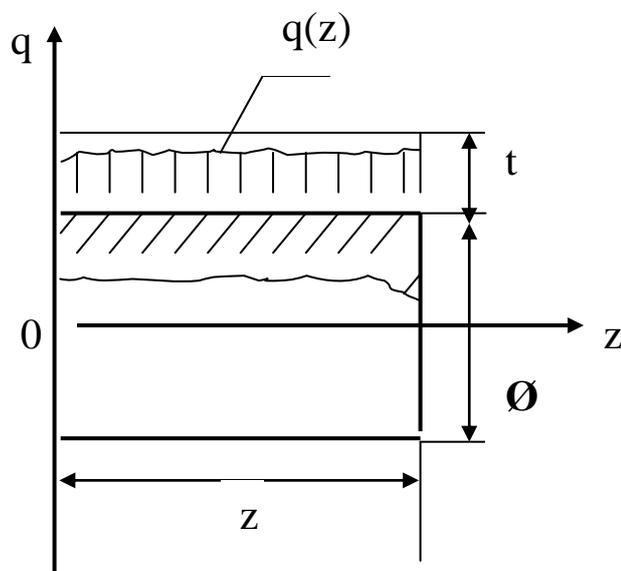


Рис. 2. Исходное и конечное положение площадей при обработке.
В связи с этим методика должна включать семь этапов:

1. Формулирование требований к новому оборудованию, в соответствии с новыми требованиями производства.
2. Расчет режимов резания, мощности, точности и производительности для нового оборудования, в соответствии с новыми требованиями производства.
3. Составление перечня станков, удовлетворяющих новым требованиям и рассчитанным значениям режимов резания, мощности, точности и производительности.
4. Количественно оценить качество несущей системы выбранных станков на заводе-изготовителе. И внести данные в шкалу качества станков этой группы, для последующего ее использования при выборе станков.
5. Сравнение качества несущей системы станков и выбор станка высокого качества.
6. После сборки станка на заводе-потребителе провести расчет количества качества несущей системы.
7. Принять решение о приемке станка окончательно, сравнив количество его качества с качеством измеренным на заводе-изготовителе.

Выводы: в данной работе представлена методика выбора металлорежущего станка при его замене на существующем производстве. Обоснована необходимость разрабатывать и принимать в приемосдаточные испытания методику выбора станка с требуемыми свойствами.

Литература

1. *Дмитриев, Б.М.*, Количественная оценка качества несущей системы металлорежущего станка: Статья. / Б.М. Дмитриев; 3с.
2. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения — Введ. 1981 -12-08.— М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981.— 48 с.
3. ГОСТ 30741-2001. Станки металлообрабатывающие. Показатели эффективности энергоиспользования. Номенклатура. Методы их выбора и назначения — Введ. 2002 -07-01.— М.: Госстандартом России, 2002.— 7 с.
4. ГОСТ 7599-82. Станки металлообрабатывающие. Общие технические условия. — Введ. 1983 -01-01.— М.: Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР, 1983.— 23 с.
5. Р50-54-11-87. Общие положения по выбору, проектированию и применению средств технологического оснащения. — Введ. 1987 -06-26.— М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт по нормализации в машиностроении, 1987.— 20 с.
6. РД 50-532-85. Методические указания. ЕСТПП. Аттестация технологических процессов.— Введ. 1986 -01-01.— М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986.— 60 с.
7. ГОСТ РВ 0015-002-2012. Система разработки и постановки на производство военной техники. Система менеджмента качества. Общие требования. — Введ. 2012 -06-05.— М.: Росстандарт, 2012.— 82 с.

Секция III

Технологии машиностроения

Председатель:

Васильев Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Технологии машиностроения» (МТ-3)

Ученый секретарь:

Заставный Евгений Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-3

УДК 658.512

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Гегам Марзпетович Алексанян⁽¹⁾, Екатерина Васильевна Прохоренкова⁽²⁾

Студент 5 курса⁽¹⁾, студент 4 курса⁽²⁾

кафедра «Технологии машиностроения»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: И.Л. Волчкевич

доктор технических наук, декан факультета «Машиностроительные технологии»

Ключевые слова: проектирование предприятий машиностроения, станки с ЧПУ, производственный процесс, техническое перевооружение.

Key words: design of machinery manufacturing facilities, CNC machines, manufacturing process, technical requirement.

Аннотация: В статье приведены результаты исследования затрат времени при работе оборудования с ЧПУ в цехах опытного многономенклатурного производства. Определены численные значения показателей эффективности, характерные при использовании современного оборудования с ЧПУ в условиях изготовления мелких партий и единичных деталей. Проанализированы причины возникновения простоев и потерь времени. Предложенная методика и полученные результаты могут быть использованы при разработке и внедрении мероприятий по техническому перевооружению и модернизации механообрабатывающего цеха, а также при составлении проектов цехов механообработки, использующих оборудование с ЧПУ.

Annotation: In this article is proposed the results of research time spent at work CNC equipment in the shops experienced multiproduct manufacturing. Calculated numerical values of performance indicators that are typical when using modern CNC equipment in a production of small batches and single parts. Analyzed the causes of downtime and loss of time. The proposed method and the obtained results can be used in the development and implementation of technical re-equipment and modernization of machining workshop, as well as the drafting workshops using CNC equipment.

Введение

Современное состояние отечественной экономики особенно остро ставит проблемы экономической эффективности производственных систем. Один из важнейших показателей – эффективность использования технологического оборудования, в особенности – дорогостоящего и высокопроизводительного. Данная проблема актуальна для машиностроительных предприятий, проекты технического перевооружения и модернизации которых, за редким исключением, связаны с применением многооперационных станков с ЧПУ, сочетающих широкие технологические возможности с высокой стоимостью. Применение данного оборудования в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства зачастую приводит к низкой эффективности использования его во времени [1]. Неисследованным до настоящего времени остается вопрос о целесообразности внедрения многооперационных станков в подразделениях и предприятий опытного производства, для которых характерны широкая номенклатура изготавливаемых деталей, малые размеры партий, а зачастую – единичные заказы, трудности с планированием работы оборудования по причине плохой предсказуемости заказов. В связи с этим выбранная тема исследования является актуальной.

Методика проведения исследований

В рамках исследования проведен качественный и количественный анализ затрат времени при обработке деталей на фрезерных станках с ЧПУ двух цехов одного из передовых предприятий машиностроения. В цехах проводилась как обработка мелких (до 15 штук) партий деталей, так и опытная отработка технологий, а также изготовление единичных деталей по заказам различных подразделений. Анализ проведен при помощи ранее разработанной методики, основанной на использовании «фотографии рабочего дня» и специально адаптированной к условиям многономенклатурного мелкосерийного производства [2].

Исследования проведены для следующих фрезерных станков с ЧПУ:

- Hermle C30 (цех 1);
- Hermle C40 (цех 1);
- Micron PM 1850U – две единицы (цех 1);
- Pittler PV 1600 (цех 1);
- DMG dmu 50 – две единицы (цех 2).

Для записи выполняемых на рабочем месте действий и фиксации связанных с этими действиями затрат времени использован специальный протокол сбора данных, далее данные переносились в протокол первичной обработки данных [2]. Пример заполненного протокола первичной обработки данных, полученных во время исследования затрат времени для фрезерного станка с ЧПУ DMG dmu 50 цеха 2 приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Протокол первичной обработки данных наблюдений для станка DMG dmu 50

Начало	Конец	Процесс	Категория	Время, ч:мин
7:30	7:40	Включение/прогрев станка	простой технический	0:10
7:40	7:55	Подготовка рабочего места к установке/снятию заготовки/детали	простой технический	0:15
7:55	8:03	Сдача инструмента в ИРК	переналадка - простой	0:08
8:03	8:45	Написание программы	переналадка - простой	0:42
8:45	8:50	Обсуждения с технологом по поводу обрабатываемой заготовки	переналадка - простой	0:05
8:50	9:10	Изучение документации, программы/ получение задания	переналадка - работа	0:20
9:10	9:18	Выбор/проверка/корректировка программы	переналадка - простой	0:08
9:18	9:32	Установка/снятие/продувка приспособления	переналадка - работа	0:14
9:32	9:39	Установка и смена элементов станочной оснастки	переналадка - работа	0:07
9:39	9:49	Измерение детали/заготовки с помощью Renishaw/датчиков в автомат.режиме	переналадка - работа	0:10
9:49	10:04	Установка/смена/регулировка инструмента/пластины +корректировка программы	переналадка - работа	0:15
10:04	10:14	Выставление "0" приспособления + корректировка программы	переналадка - работа	0:10
10:14	10:25	Отладка программы "по воздуху"	переналадка - работа	0:11

10:25	10:28	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	переналадка - работа	0:03
10:28	10:37	Обработка заготовки в автоматическом режиме	переналадка - работа	0:09
10:37	10:40	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	переналадка - работа	0:03
10:40	10:43	Контроль на рабочем месте/контроль на станке без снятия вручную	переналадка - работа	0:03
10:43	10:46	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	переналадка - работа	0:03
10:46	10:55	Обработка заготовки в автоматическом режиме	переналадка - работа	0:09
10:55	10:58	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	переналадка - работа	0:03
10:58	11:01	Контроль на рабочем месте/контроль на станке без снятия вручную	переналадка - работа	0:03
11:01	11:05	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	переналадка - работа	0:04
11:05	11:14	Обработка заготовки в автоматическом режиме	переналадка - работа	0:09
11:14	11:17	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	переналадка - работа	0:03
11:17	11:30	Контроль на рабочем месте/контроль на станке без снятия вручную	переналадка - работа	0:13
12:30	14:00	Контроль в ОТК	переналадка - простой	1:30
14:00	14:03	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:03
14:03	14:12	Обработка заготовки в автоматическом режиме	работа автоматическая	0:09
14:12	14:15	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:03
14:15	14:17	Контроль на рабочем месте/контроль на станке без снятия вручную	работа ручная	0:02
14:17	14:21	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:04
14:21	14:30	Обработка заготовки в автоматическом режиме	работа автоматическая	0:09
14:30	14:33	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:03
14:33	14:35	Контроль на рабочем месте/контроль на станке без снятия вручную	работа ручная	0:02
14:35	14:39	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:04
14:39	14:48	Обработка заготовки в автоматическом режиме	работа автоматическая	0:09
14:48	14:52	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:04
14:52	14:55	Контроль на рабочем месте/контроль на станке без снятия вручную	работа ручная	0:03

14:55	15:00	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:05
15:00	15:09	Обработка заготовки в автоматическом режиме	работа автоматическая	0:09
15:09	15:13	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:04
15:13	15:20	Измерение детали/заготовки с помощью Renishaw/датчиков в автомат. режиме	простой технический	0:07
15:20	15:24	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:04
15:24	15:33	Обработка заготовки в автоматическом режиме	работа автоматическая	0:09
15:33	15:36	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:03
15:36	15:40	Контроль на рабочем месте/контроль на станке без снятия вручную	работа ручная	0:04
15:40	15:44	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:04
15:44	15:54	Обработка заготовки в автоматическом режиме	работа автоматическая	0:10
15:54	16:00	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:06
16:00	16:07	Измерение детали/заготовки с помощью Renishaw/датчиков в автомат. режиме	простой технический	0:07
16:07	16:10	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:03
16:10	16:20	Обработка заготовки в автоматическом режиме	работа автоматическая	0:10
16:20	16:24	Установка/снятие/продувка/протирка заготовки/детали	работа ручная	0:04
16:24	16:30	Контроль на рабочем месте/контроль на станке без снятия вручную	работа ручная	0:06
16:30		Конец наблюдений		

Обработка результатов исследований структуры затрат времени работы фрезерных станков с ЧПУ

На основании данных протоколов первичной обработки данных рассчитаны суммы затрат времени по категориям (обработка, простои, отработка, переналадка, исправление брака) [3]. Далее рассчитаны доли затрат по каждой из категорий в общем времени наблюдения (в процентах). На основании полученных данных для каждого из станков построены диаграммы структуры затрат фонда времени работы оборудования (рис. 1 – рис. 6). Также рассчитаны коэффициенты экстенсивного использования оборудования $K_{эи}$ и коэффициенты использования времени межналадочных периодов $\eta_{ис}$. Расчеты и построение диаграмм автоматизированы и проводятся в среде «Microsoft Excel.»

Расчет коэффициентов проведен для:

- каждой из семи единиц оборудования;
- группе оборудования одинаковых моделей (для станков Hermle, Micron, DMG);
- фрезерным станкам с ЧПУ разных цехов.

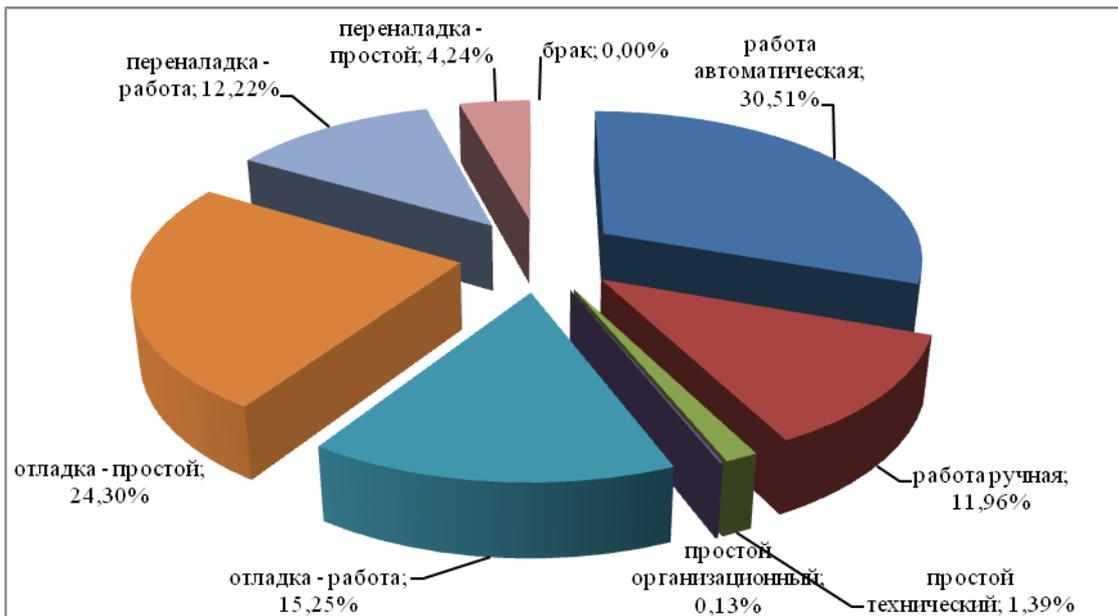


Рис. 1. Структура затрат времени работы станка Hermle C30 за время наблюдений (10 рабочих смен)

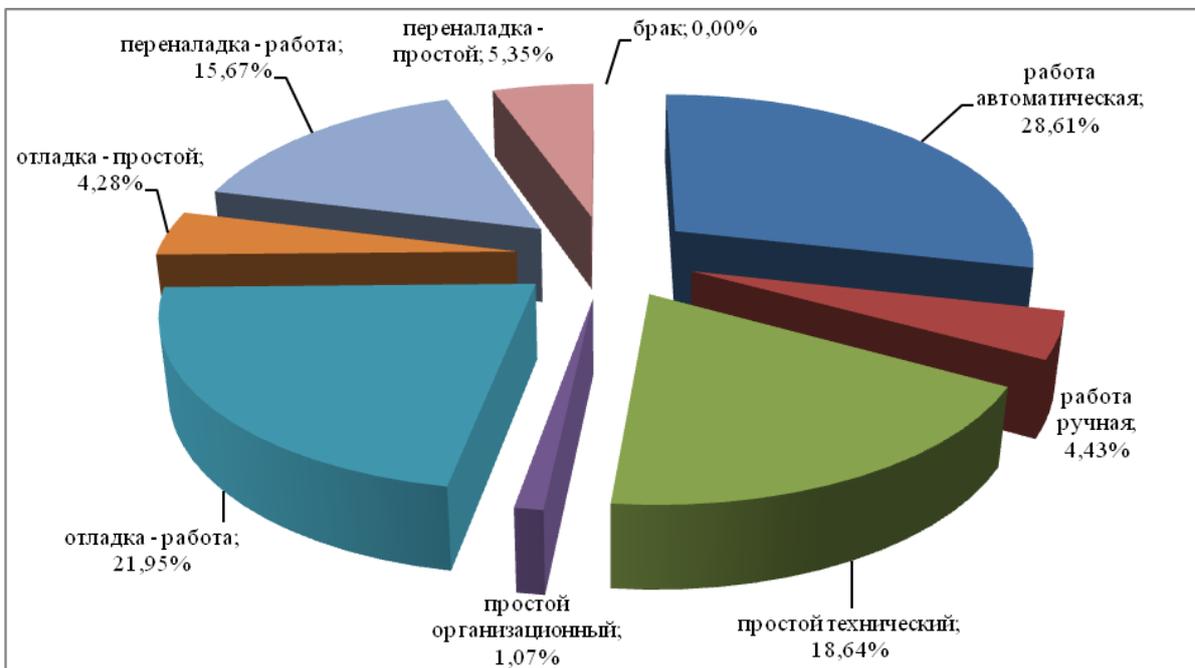


Рис. 2. Структура затрат времени работы станка Hermle C40 за время наблюдений (10 рабочих смен)

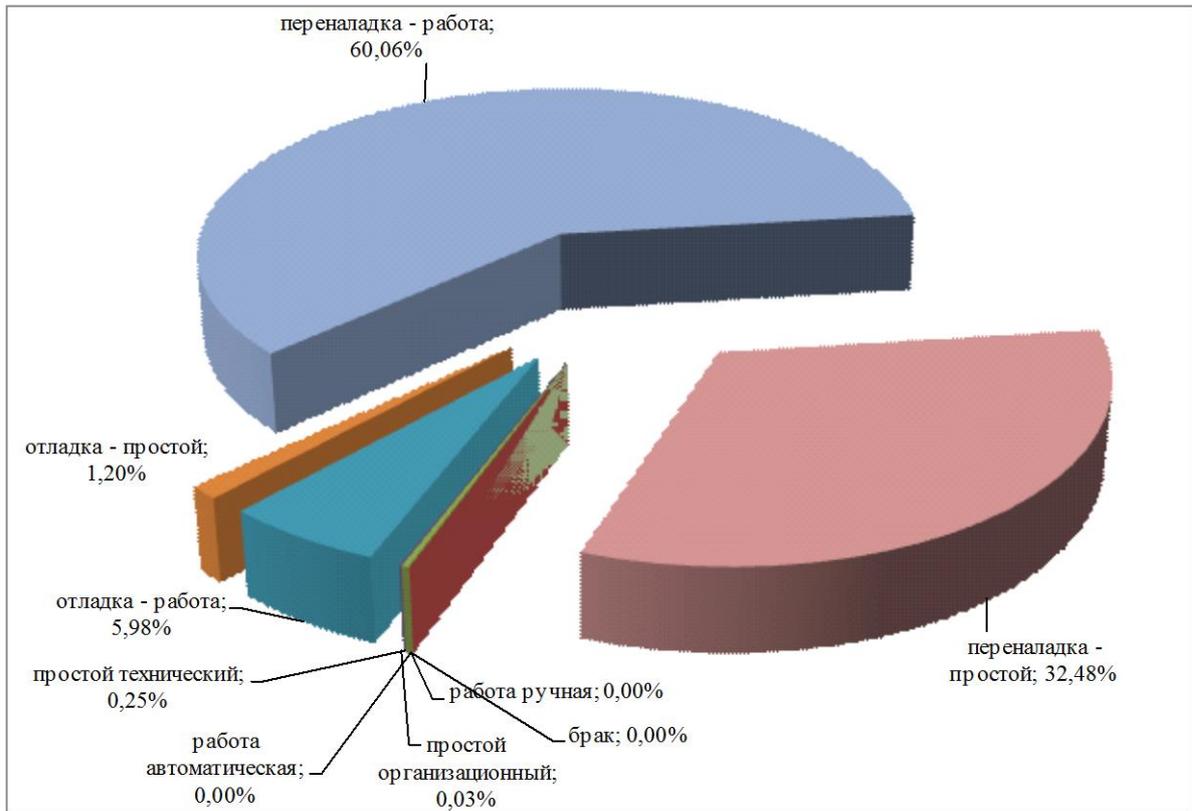


Рис. 3. Структура затрат времени работы станка Micron PM 1850 U «левый» за время наблюдений (10 рабочих смен)

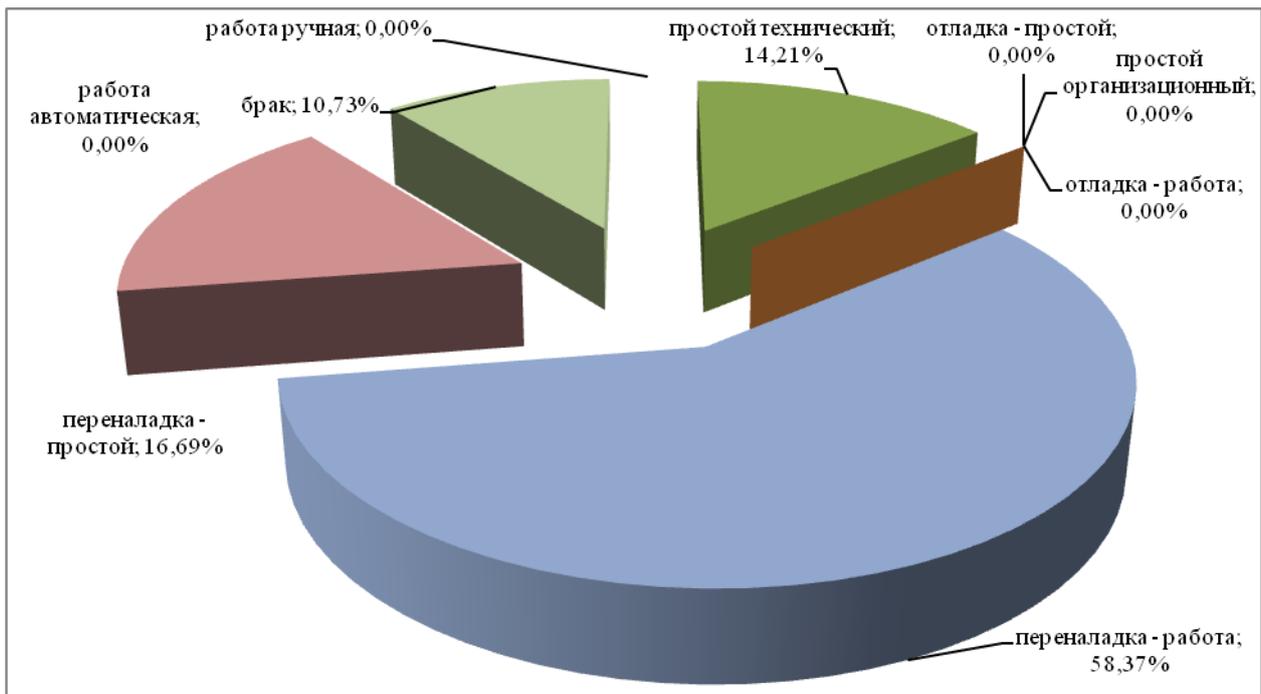


Рис. 4. Структура затрат времени работы станка Micron PM 1850 U «правый» за время наблюдений (10 рабочих смен)

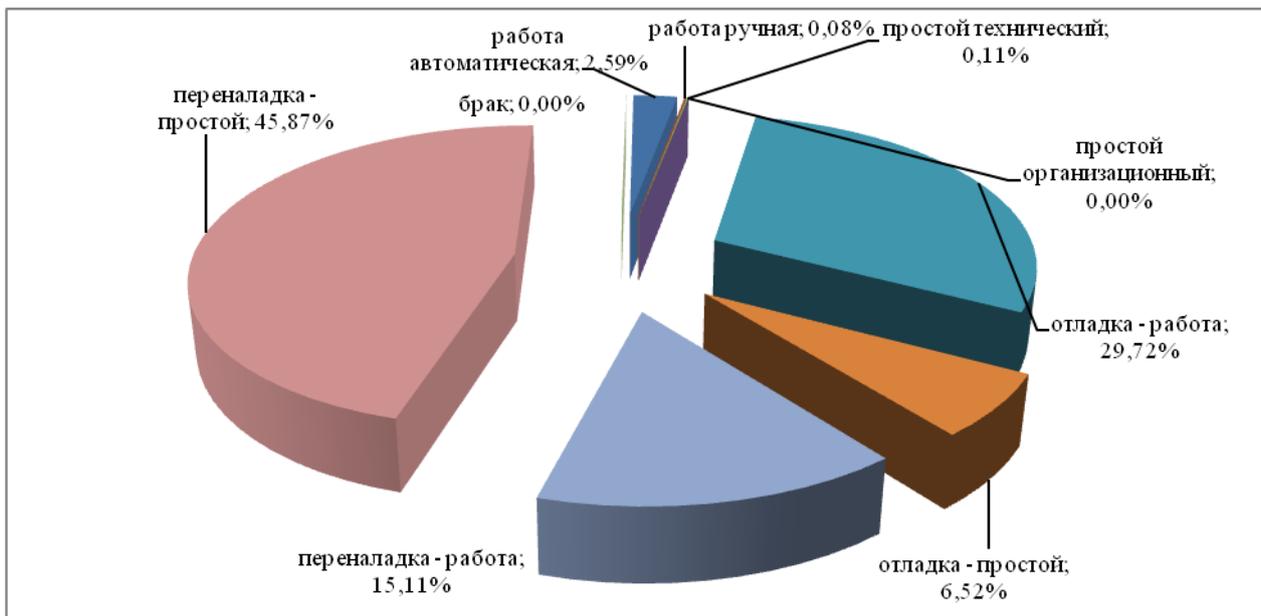


Рис. 5. Структура затрат времени работы станка Pittler PV 1600 за время наблюдений (10 рабочих смен)

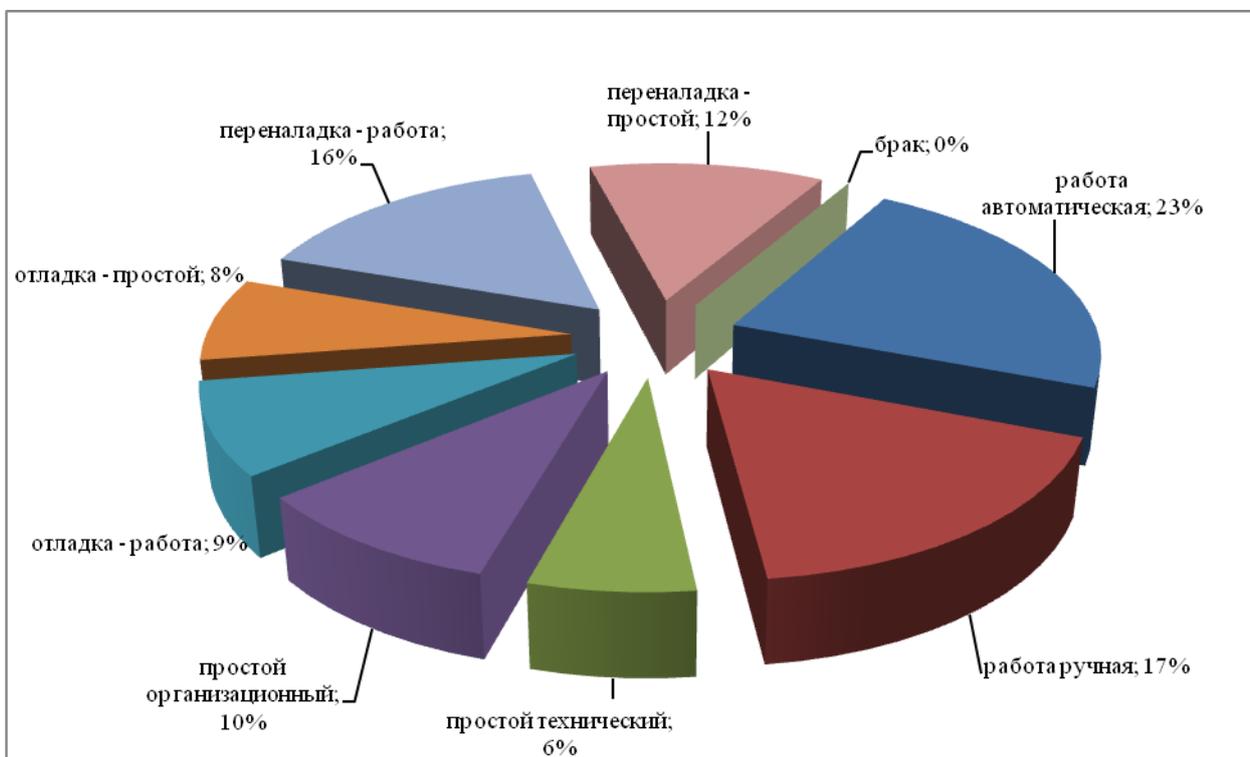


Рис. 6. Структура затрат времени работы станков DMG dmu 500 за время наблюдений (10 рабочих смен)

Рассчитанные коэффициенты $K_{эи}$ и $\eta_{ис}$ сведены в таблицы (таблицы 2 и 3), дающие представление о затратах времени по участкам фрезерных станков с ЧПУ в целом и «узких местах».

Сравнение коэффициентов $K_{эи}$ и $\eta_{ис}$ дает сравнительную картину доли непроизводительных затрат времени, происходящих по «внешним» и «внутренним» для цеха причинам.

Поскольку ряд станков цеха 1 (станки Micron и Pittler) за время наблюдений изготавливали детали с размером партии одна штука, и эта работа считалась, как переналадка, имеет смысл при расчете коэффициентов считать время обработки детали по программе, как время работы. Тем не менее, с точки зрения рационального использования оборудования, планирование операционных партий по одной штуке, безусловно, является неудачным.

Таблица 2.

Значения коэффициентов экстенсивного использования $K_{эи}$ для фрезерных станков с ЧПУ цехов 1 и 2

№ п/п	Наименование станков	Перечень станков по модели	Цех	Кэи		
				Кэи по каждому станку	Кэи по модели	Кэи по цехам
1	Hermle C30	Hermle	1	0,31	0,3	0,31*/0,46
2	Hermle C40			0,29		
	Micron PM 1850U «левый»	Micron PM 1850U		0,66	0,62	
4	Micron PM 1850U «правый»			0,58		
5	Pittler PV 1600	Spinner PD-CNC		0,32	0,32	
-	DMG dmu 500	DMG dmu 500	2	0,23	0,23	0,23

Таблица 3.

Значения коэффициентов использования $\eta_{ис}$ для фрезерных станков с ЧПУ цехов 1 и 2

№ п/п	Наименование станков	Перечень станков по модели	Цех	$\eta_{ис}$		
				$\eta_{ис}$ по каждому станку	$\eta_{ис}$ по модели	$\eta_{ис}$ по цехам
1	Hermle C30	Hermle	1	0,69	0,62	0,62*
2	Hermle C40			0,54		
	Micron PM 1850U «левый»	Micron PM 1850U		0,66	0,62	
4	Micron PM 1850U «правый»			0,58		
5	Pittler PV 1600	Spinner PD-CNC		0,82	0,82	
	DMG dmu 500	DMG dmu 500	2	0,41	0,41	0,41

Выводы

Сравнительный анализ степени использования фонда времени в целом и использования времени межналадочных периодов показывает:

1 Средний коэффициент экстенсивного использования фрезерных станков с ЧПУ, без учета обработки операционных партий размером в одну штуку, составляет 0,31 для фрезерных станков с ЧПУ цеха 1 и 0,23 для фрезерных станков с ЧПУ цеха 2; таким образом, только 31% времени тратится на производительную работу; рассчитывать средний коэффициент использования, общий для цехов 1 и 2 не имеет смысла.

2 Для всех станков среди непроизводительных затрат времени наибольшую долю занимают простои, связанные с наладочными процессами (отработки новых деталей и переналадки на обработку уже освоенных деталей).

3 Средний коэффициент использования времени межналадочных периодов составляет 0.62 для фрезерных станков с ЧПУ цеха 1 и 0,41 для фрезерных станков с ЧПУ цеха 2; это означает, что, даже без учета наладочных процессов, почти 40% времени расходуется на технические и организационные простои.

4 Доля времени, затрачиваемого на исправление брака незначительна.

5 Для дальнейшего изучения причин непроизводительных затрат времени и выработки корректирующих мероприятий необходим более детальный анализ затрат по каждой из выделенных категорий.

6 Необходимы выработка и внедрение комплекса корректирующих мероприятий с целью повышения доли времени, затрачиваемого на производительную работу.

Литература

- 1 Волчкевич И.Л. Проблема рационального использования станков с ЧПУ в отечественной промышленности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 5 (в 3-х ч.). Ч. 3. С. 48-53
- 2 Волчкевич И.Л., Васенина Н.М. Методика исследования фактической производительности станков с ЧПУ в условиях многономенклатурного производства // Инженерный Вестник. Электронный научно-технический журнал. 2014. № 11. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/746833.html>
- 3 Волчкевич И.Л. Декомпозиция фонда времени, как основа для расчетов необходимого количества оборудования в условиях многономенклатурного производства // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 9. С. 62-64.

УДК 621.757

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ

Дмитрий Николаевич Алешин⁽¹⁾, Никита Александрович Мартынович⁽²⁾

Магистр 2 года⁽¹⁾, аспирант 3 года⁽²⁾

кафедра «Технология машиностроения»

Московский государственный машиностроительный университет «МАМИ»

Научный руководитель: М.В. Вартанов

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

В статье представлен экспериментальный комплекс для исследования процесса роботизированной сборки цилиндрических и профильных соединений типа «вал-втулка» с гарантированными малыми зазорами (0,01 мм и менее) в динамике.

Данный экспериментальный комплекс, общий вид которой представлен на рисунке 1 состоит из двух основных частей: экспериментальной установки и системы контрольно-измерительной аппаратуры, подключенной к компьютеру. Между адаптивным захватывающим устройством 2 и торцом выходного звена промышленного робота расположен высокоточный датчик контроля усилий и моментов 5. При этом схват относительно робота имеет две степени свободы – вращение в горизонтальной плоскости и поступательное перемещение по вертикали. Также на специальном постаменте установлено вибрационное устройство 1, рассмотренного в работах [1] и [2], которое в центре ориентирующего диска выходного звена имеет жестко закрепленную собираемую втулку 7 [3].

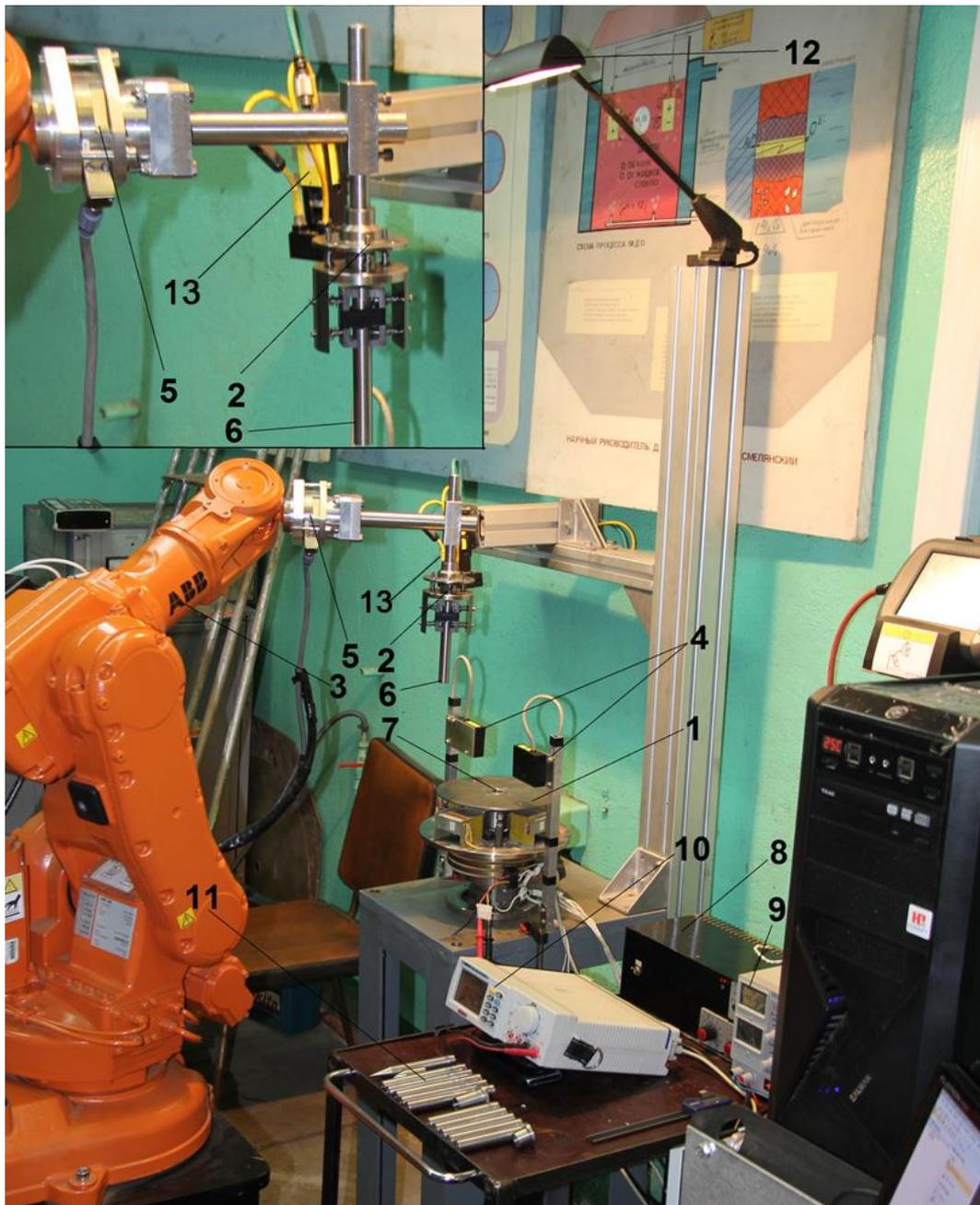


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки с вибрациями:
1 – вибрационная опора; 2 – адаптивный схват (пассивная адаптация); 3 – промышленный робот; 4 – лазерные триангуляционные датчики; 5 – силомоментный датчик; 6 – присоединяемая деталь (вал); 7 – базовая деталь (втулка); 8 – генератор гармонических сигналов; 9 – источник питания лазерных триангуляционных датчиков; 10 – электронный частотомер; 11 – экспериментальные образцы; 12 – дополнительное освещение; 13 – камера системы технического зрения

Вибрационное устройство представляет собой двухзвенный манипулятор. Каждое звено имеет одну степень свободы – вращение. Оси вращения звеньев расположены в одной плоскости и взаимно перпендикулярны. Звенья приводятся в движение четырьмя электромагнитами (по два на каждое звено) за счет их взаимодействия с постоянными магнитами, установленными на звеньях. Напряжение на приводные электромагниты подается от генератора низкочастотных гармонических сигналов 8. Оба звена имеют пружинные демпферы, которые предотвращают удары в крайних положениях.

Адаптивный схват (рисунок 2) изготовлен в соответствии с кинематической схемой метода, которая предполагает возможность упругих перемещений собираемого вала в вертикальной плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Схват состоит из корпуса 1, установленного на штанге 2 и соединенного по направляющим шпилькам 6 через пружины 7 с опорной тарелкой 3, имеющей упорную шайбу 8. В корпусе 1 располагаются зажимные губки 4, выполненные в виде призм и соединенные с корпусом по шпилькам 5 через пружины 7. Расчет пружин проводится, исходя из величин требуемой жесткости и конструктивных особенностей схвата.

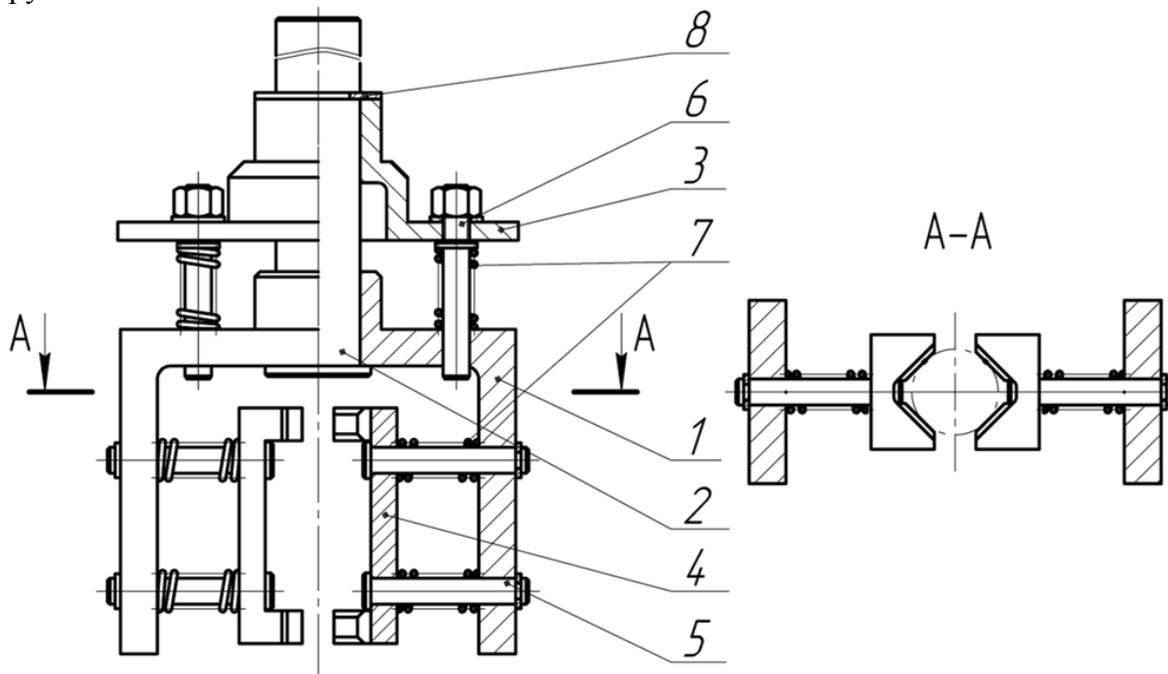


Рис. 2. Адаптивный схват

Конструктивные и функциональные особенности экспериментальной установки позволяют варьировать следующие параметры:

частота колебаний виброопоры – в диапазоне 1...30 Гц с шагом 0,5 Гц;

линейная амплитуда колебаний выходного звена виброопоры – в диапазоне 0,4...3 мм с шагом 0,1 мм;

величина линейного рассогласования положения осей собираемых деталей – в диапазоне 0...2 мм с шагом 0,05 мм;

зазор в соединении;

жесткость пружин схвата: 0,125 Н/мм, 0,333 Н/мм, 0,5 Н/мм.

С целью подтверждения возможности использования предлагаемого метода сборки для цилиндрических бесфасочных соединений с малыми зазорами были изготовлены детали по 7-му качеству с соответствующими посадками и геометрией с зазорами от 0,07 до 0,01 мм. Данные приведены в таблице 1.

Литература

1. Божкова Л.В., Вартапов М.В., Кольчугин Е.И. Вопросы вибрационной технологии// Межвузовский сборник научных статей «Вопросы вибрационной технологии», 2006, Ростов-на-Дону, с.62-67.
2. Божкова Л.В., Вартапов М.В., Кольчугин Е.И Экспериментальная установка для роботизированной сборки// «Сборка в машиностроении, приборостроении», 2009, №1 с.5-7.
3. Патент на изобретение «Способ сборки соединений типа «вал-втулка». Вартапов, Божкова, Кольчугин. № 2381095. Опубл. 10.02.2010 Бюлл. №4.

УДК 621.01

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА И АНАЛИЗ ЗАТРАТ

Светлана Олеговна Верескунова

Студент 5 курса

кафедра «Технология машиностроения»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.В. Галий

ассистент кафедры «Технологии машиностроения»

Обеспечение стабильной работы предприятий по выпуску конкурентоспособной продукции, является задачей первостепенной важности для управляющих всех уровней. Важнейшей качественной характеристикой хозяйствования на всех уровнях является - эффективность производства.

Снижение издержек производства, рациональное использование материальных ресурсов, достижение более высоких экономических показателей и, прежде всего повышение производительности труда и эффективности производства, и на этой базе снижение себестоимости – наиболее важные и актуальные задачи работников управления производством. Для их решения большое значение имеет совершенствование управления с использованием методов эффективного управления производством, а также расчеты и сравнение показателей эффективности предприятия.

Эффективность производства стала реальным объектом исследования в процессе зарождения новой науки управления. Ф. Тейлор, Ф. и Л. Гилбреты, Г. Гантт, А. Файоль, Г. Эмерсон, Л. Урвик, М. Вебер, Г. Форд впервые системно раскрыли необходимость и возможность определения критерия эффективности производства. Основное внимание ими уделялось производительности труда. Ненадолго отстав, отечественные экономисты в 20-х годах решали подобные задачи в специфических условиях чрезмерного напряжения сил и централизации экономики. Работы Л.Н. Литошенко, М.М. Прото-дьяконова, Я. Розенфельда, С. Лифшица, П. Дашковского, С.А. Кукель-Краевского были в основе разработок по данной проблеме в отечественной литературе.

За рубежом исследования в этой области научных знаний шли более или менее равномерно. Работы Дж. М. Кейнса, Дж. Дина, Е. Гранта, Г. Терборга, труды института МАПИ (МАРІ) стали основой современных методов оценки эффективности инвестиций, обновления оборудования.

Для того, чтобы предприятие могло производить продукцию, отвечающую мировым стандартам, необходим комплексный подход к управлению производством: при минимальном использовании имеющихся ресурсов стремиться к получению максимальной прибыли при выполнении требований к качеству продукции.

Проблема эффективности машиностроительного производства проявляется на всех этапах создания продукции: проектировании и разработке технических требований, материально – техническом снабжении, подготовке и разработке производственных процессов, самой стадии изготовления и гарантийного обслуживания. При проектировании процессов производства необходимо исходить из планируемых технико-экономических показателей, определить которые можно при любом объеме информации об изделии. Необходимо исследовать процесс формирования качества на этапах проектирования и в условиях эффективного производственного процесса.

Производственные процессы состоят из технологических процессов и технологических операций. При прохождении каждого процесса или операции увеличиваются затраты, также увеличивается стоимость и ценность продукции.

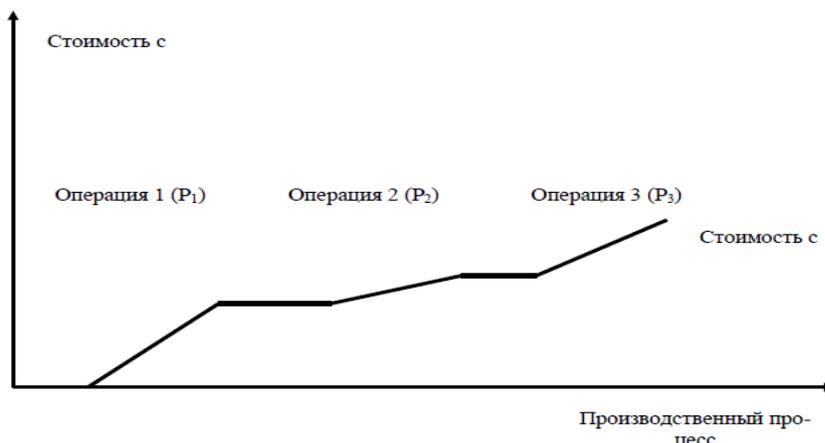


Рис.1. Изменение добавленной стоимости продукта и вероятности достижения качества по мере прохождения производственного процесса

Для выявления возможных путей повышения эффективности производства был произведен анализ затрат на выполнение операций на многоцелевых станках с ЧПУ предприятия ФГУП НПЦАП им. академика Н. А. Пилюгина в комплексе с региональными потребителями его продукции.

Суммарные затраты, связанные с выполнением технологической операции на многоцелевом станке ($Z_{оп}$) можно оценить с помощью приведенных ниже формул [1]:

$$Z_{оп} = Z_{ин} + Z_{об} + Z_э + Z_p + Z_{пр} + Z_{уп}, \quad (1)$$

где $Z_{ин}$ – затраты на инструментальное оснащение операции; $Z_{об}$ – затраты, связанные с эксплуатацией оборудования; $Z_э$ – затраты на электроэнергию; Z_p – заработная плата основных рабочих; $Z_{пр}$ – затраты на проектирование и изготовление приспособления; $Z_{уп}$ – затраты на подготовку управляющей программы.

Затраты на инструментальное оснащение операции (первичные), связанные с приобретением или изготовлением инструмента ($Z_{ин}$):

$$Z_{ин} = \sum_{i=1}^{i=M(V_n)} K_{ин} C_{ин}, \quad (2)$$

где $K_{ин}$ – количество инструмента i вида (типоразмера) в инструментальном оснащении операции; $C_{ин}$ – стоимость инструмента i вида (типоразмера).

Затраты, связанные с эксплуатацией оборудования при реализации операции ($Z_{об}$):

$$Z_{об} = t_{шт.к} C_{см}, \quad (3)$$

где $C_{см}$ – стоимость станко-минуты эксплуатации оборудования.

Затраты на электроэнергию, связанные с реализацией операции ($Z_э$):

$$Z_э = \frac{P_z \cdot t}{1020 \cdot 60} C_{квт}, \quad (4)$$

$C_{квт}$ – стоимость одного квт-часа электроэнергии.

Заработная плата основных рабочих (Z_p):

Г
де

$$Z_p = \frac{C_{шт.к}}{60} C_{т.ч.}, \quad (5) \quad \text{де}$$

$C_{т.ч.}$ – действующая часовая тарифная ставка для рабочего соответствующей квалификации.

Затраты на проектирование и изготовление приспособления предложено определять по формуле:

$$Z_{пр} = C_c K_{пр}, \quad (6) \quad \text{з}$$

затраты на подготовку управляющих программ для многоцелевых станков, используемых при изготовлении иных операционных партий деталей заданной номенклатуры:

$$Z_{уп} = \bar{C}_k \cdot K_{уп}, \quad (7) \quad \text{г}$$

де

$K_{уп}$ – фактическое число кадров в управляющей программе.

Среднее значение стоимостной характеристики сложности управляющей программы, приведенное к одному кадру (\bar{C}_k):

$$\bar{C}_k = \frac{Z_{уп}}{K_{уп}}, \quad (8)$$

Среднее значение указанных затрат для уже изготовленных операционных партий деталей ($\bar{Z}_{уп}$):

$$\bar{Z}_{уп} = \frac{\sum_k^{k=k_p} (Z_{уп})_k}{k_p}, \quad (9)$$

где $(Z_{уп})_k$ – затраты на подготовку управляющей программы для изготовления k-ой операционной партии; k_p – число операционных партий изготовленных деталей. Среднее число кадров в управляющих программах, использованных при изготовлении уже реализованных операционных партий деталей ($\bar{K}_{уп}$):

$$\bar{K}_{уп} = \frac{\sum_k^{k=k_p} (K_{уп})_k}{k_p}, \quad (10)$$

где $(K_{уп})_k$ – число кадров в управляющей программе, использованной для изготовления k-ой операционной партии деталей.

Согласно исследованию затрат внутри предприятия наиболее значимыми являются затраты, связанные с заработной платой основных рабочих, эксплуатацией оборудования, инструментальным обеспечением и электроэнергией. С использованием приведенных соотношений, проведен количественный анализ значений затрат на выполнение 10 операций обработки заготовок корпусных деталей на многоцелевых станках с ЧПУ. Обработка осуществлялась на экономичных режимах резания. На основе полученных данных определены методы сбережения основных производственных ресурсов технологических операций. В качестве опытных образцов были выбраны 10 корпусных деталей из различных материалов: 20X13, 45-1-79НМ, АМг6, АМг3, ВТ5-1. Достигаемые показатели качества для них варьируются от Ra12,5 до Ra1,25. Для данных деталей составлена таблица, в которой были установлены типы обрабатываемых поверхностей, виды и количество используемых

инструментов, число совершенных элементарных переходов. Пример табличного формирования данных приведен в таблице 1.

Таблица 1. Данные исследований для детали

№ дет.	материал	тип обрабатываемой поверхности	достигаемые показатели качества	вид инструмента (количество видов)	число элементарных переходов	Зип	Зоб	Зэ	Зр
						руб			
1	20X13	плоскость 1	Rz80	фрезы концевые - 2, сверла - 2	283	36000	2687	3292	128,8
		плоскость 2							
		плоскость 3							
		плоскость 4							
		плоскость 5							
		внешняя цилиндрическая							
		отверстие			102				

Соотношение всех статей расходов показано на рисунке 2. В ходе исследования выяснилось, что наибольшие затраты связаны с инструментальным оснащением (более 70%). Для сокращения всех видов затрат были выработаны рекомендации по сбережению основных видов ресурсов производства. Все рекомендации представлены в таблице 2.

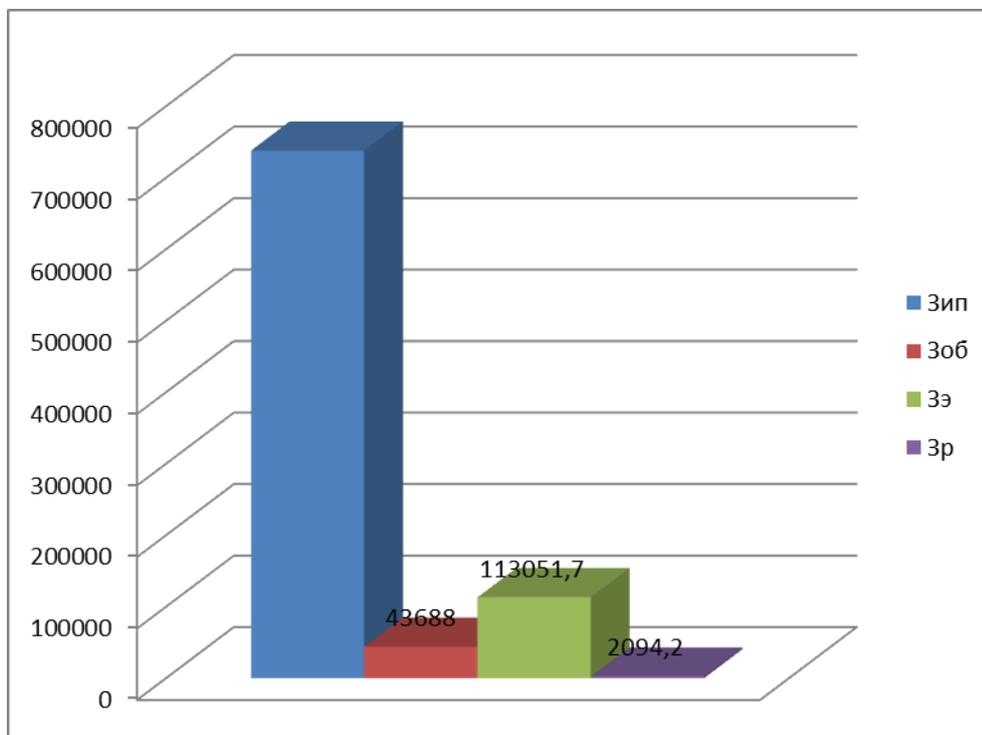


Рис.2. Диаграмма распределения затрат при изготовлении десяти деталей

Таблица 2. Основные показатели производственных ресурсов технологической операции и методы их сбережения

Вид ресурса	Показатель ресурса или его расхода	Метод сбережения
Средства производства	Множество видов инструмента; количество инструмента каждого вида; общее количество инструмента в операции	Использование возможностей инструмента и оборудования с ЧПУ: построение операций из инструментальных переходов; рациональная концентрация переходов и структура операции
	Стойкость инструмента	Рациональный выбор режима обработки; обоснованное определение количества используемого в операции инструмента
Энергетический	Расход электроэнергии	Рациональный выбор режима обработки; построение рациональной структуры операции
Финансовый	Затраты на инструмент	Ограничение количества и числа видов применяемого инструмента; рациональный выбор режима обработки; построение рациональной структуры операции
	Затраты на приспособление	Построение рациональной структуры операции; правильный выбор схемы установки; применение переналаживаемых или универсальных приспособлений простых конструкций
	Затраты на электроэнергию	Построение рациональной структуры операции; рациональный выбор режима обработки

Литература

1. *Анискин Ю.П., Моисеева Н.К., Проскураков А.В.* Новая техника: повышение эффективности создания и освоения. М.: Машиностроение, 1984. 192 с.
2. *Инженерная экономика: Учебник /Под ред. А.А. Колобова и А.И. Орлова.* М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 668 с.: ил.
3. *Моисеева Н.К.* Выбор технических решений при создании новых изделий. М.: Машиностроение, 1980. 181 с.

УДК 621.757

ВЫБОР КОМПОНОВКИ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОЙ ЛИНИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВАЛОВ-ШЕСТЕРЕНЛидия Александровна Казарина⁽¹⁾, Андрей Владимирович Погорелый⁽²⁾*Студент 5 курса^{(1),(2)}**кафедра «Технология машиностроения»**Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)**Научный руководитель: С.Л. Петухов**кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»*

Важнейшим условием качественного группирования является достоверный выбор информативных признаков и их значений при определении подобия деталей. Правильный выбор существенно зависит от состава технологического оборудования гибкой производственной системы (ГПС), на котором будет проводиться обработка [1, 2]. Для проектируемой ГПС задача группирования решалась одновременно с определением структуры группового технологического процесса и структуры компоновочной схемы ГПС.

Описание детали x_i проводится при помощи универсального набора переменных: геометрической формы детали, массы и материала заготовки, габаритных размеров, точности размеров и качества поверхностей, серийности изготовления, взаимное расположение элементарных обрабатываемых поверхностей с одной стороны детали, а также взаимное расположение сторон обработки в пространстве.

Для выражения принадлежности детали x_i к каждой группе использовалось понятие – характеристическая функция $\mu_A(i)$, значение которой указывает, является ли (да или нет) деталь x_i элементом подмножества деталей с данным признаком, то есть $\mu_A(i)=1$, если $i \in A$ и $\mu_A(i)=0$, если $i \notin A$. Такое представление привычно для существующих методик группирования, предполагающее четкое отнесение детали к какой-либо группе.

Для каждой детали задавались вектора-характеристики $x = (x_1, x_2, \dots, x_l)$, где l – количество признаков подобия, а $x_i, i = 1, 2, \dots, l$ – количественные выражения близости деталей по каждому из признаков. Векторы-характеристики деталей определялись на основании группового технологического процесса обработки или сборки, когда размерность векторов определяется числом элементарных технологических переходов для обработки всех деталей группы, а компоненты векторов равны 1 или 0 в зависимости от того, выполняется или нет данный переход для конкретного изделия.

Изделия распределяются по группам по степени их близости к векторам-представителям групп. Каждый из векторов-представителей имеет свою область притяжения, попадание в которую вектора-характеристики означает принадлежность этого изделия соответствующей группе. Для разбиения изделий на группы используется аппарат теории нечетких множеств.

Каждой из групп, имеющей вектор-представитель V_1, V_2, \dots, V_m ставится в соответствие нечеткое множество $A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$ изделий из общей совокупности изделий $x (A_j \in x)$. Изделие с вектором-характеристикой $x_i \in x$ включается в каждое множество A_j с определенной степенью принадлежности μ_{ij} , заключенной между 0 и 1.

μ_{ij} представляет собой нормированную степень близости вектора-характеристики x_i к вектору-представителю V_j .

Для расположения векторов-представителей вблизи центров группирования после определения степеней принадлежности производится уточнение векторов-представителей по формуле:

$$V_j^1 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}^2 x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}^2}$$

Это позволит сдвинуть вектор V_j ближе к центру группирования векторов x_i , имеющих высокие степени принадлежности к J -й группе.

После уточнения векторов-представителей уточняются μ_{ij} - степени принадлежности, затем снова уточняются векторы-представители и т.д. Разделение на группы заканчивается, когда очередное уточнение векторов-представителей не приводит к существенному их изменению, то есть $\max \|V_j - V_j^1\| \leq \varepsilon$, где ε – выбранный параметр останова алгоритма расчета.

Тип применяемого оборудования может существенно повлиять на время переналадки.

В нашем случае эта задача решалась приближенно на основе балльной системы путем разделения всех операций, по которым операции различаются между собой на группы в порядке возрастания сложности переналадки и присвоения определенного балла сложности для операций каждой группы. Описание каждой детали включало совокупность элементарных технологических переходов, необходимых для ее полной обработки. Задав ограничения на последовательность и совмещение переходов в зависимости от характера обработки, требований к точности и качеству обработки, возможностей оборудования, можно получить информацию о наименьшем числе позиций для обработки и о совокупности элементарных операций, которые могут быть объединены в одну позицию.

Сравнивая между собой полученную информацию о требованиях к обработке двух деталей, можно:

- выделить одинаковые операции на одинаковых позициях, требующих применения одних и тех же инструментов и режимов обработки с одинаковой ориентацией инструмента относительно сторон обработки (балл сложности переналадки – 0);
- выделить операции, требующие только замены инструмента или добавления его в многоинструментальную силовую головку (балл сложности переналадки – 1);
- выделить операции, требующие новой настройки силовых головок (изменения режимов резания, ориентации инструмента и т.п. (балл сложности переналадки – 2);
- выделить операции, требующие включения в работу новых силовых головок или замены одних головок другими (балл сложности переналадки – 3);
- выделить операции, для осуществления которых необходимо числа позиций (балл сложности переналадки – 4).

На основании выбранного алгоритма детали разбивались на группы. Векторы-представители групп имеют свою область притяжения, попадание в которую вектора-характеристики означает принадлежность детали соответствующей группе.

Приняв для простоты, что программы выпуска и станкоемкости всех изделий одинаковы, вся программа выпуска разбивается на примерно равные по числу изделий группы. Результаты группирования получаются в виде нечетких множеств, определяющих принадлежность всех

изделий к каждой группе. Это позволяет свободно варьировать составами групп и обеспечивать их равномерность по суммарным трудоемкостям обработки в течение года.

Предложенная методика группирования была применена для комплектования партий ведущих шестерен, что дает возможность создания групповых технологических процессов, позволяющих использовать принципы поточно-массового производства при серийной обработке валов-шестерен,

В серийном поточном производстве достигается высокая производительность труда, низкая себестоимость изделий, сокращается цикл производства.

Ведущие шестерни имеют идентичную конструкцию, и для их обработки может быть использовано однотипное оборудование с переналадкой определенных элементов установочных приспособлений, ориентирующих и подающих детали устройств и механизмов. В связи с необходимостью выполнения обработки ведущих шестерен главной передачи разных производителей предлагается базовая гибкая автоматизированная линия.

При организации гибкого производства в первую очередь выбирается вариант с оптимальной концентрацией видов обрабатываемых изделий по критерию минимальных приведенных затрат. При этом учитываются затраты на оборудование.

Стратегическая гибкость производственной системы определяется количеством видов изделий, а тактическая – концентрацией технологического оборудования, которая определяется частотой переналадок или величиной коэффициента закрепления операций $K_{з.о.}$, который представляет собой отношение числа детали-операций к числу рабочих мест, соответствующего условию изготовления продукции с минимальными приведенными затратами $Z_{ПП \min}$.

Одним из важнейших вопросов групповой обработки изделий на переналаживаемом оборудовании является планирование загрузки оборудования с учетом программы выпуска изделий и потерь времени на переналадку для обработки каждого последующего изделия группы.

По числу видов изделий, годовой программы выпуска каждого вида – N , размеру партии – n и периодичности Y запуска отдельных партий изделий на обработку определяется коэффициент закрепления операций $K_{з.о.}$, а также отклонения от оптимальной стратегической и тактической гибкости.

Для обеспечения устойчивого гибкого производства был произведен подбор изделий и скомплектованы группы из них; выбрана наиболее экономичная гибкость и ее организационно-плановое обеспечение, для чего проведена синхронизация позиций обработки, выбраны оптимальные размеры партий изделий, последовательность их запуска. Разработан технологический процесс и планировка линии, спроектирована оснастка для каждой группы изделий, транспортно-загрузочные устройства, рассчитаны загрузка рабочих мест и основные параметры линии.

Проектируемая линия предназначена для обработки пяти видов валов-шестерен.

Для проектируемой линии решалась задача выбора ритма обработки каждого типа шестерен. Поиск оптимальной величины ритма $R_{опт}$ определялся по минимуму приведенных затрат.

Были выбраны оптимальные объемы партий изделий, размеры которых экономически обоснованы и соответствуют оптимальному $K_{з.о.опт}$, подобрана такая периодичность их запуска, чтобы обеспечить выпуск конечной продукции предприятия в заданные сроки и с затратами, равными $Z_{ПП \min}$.

Проектирование новых изделий одинакового функционального назначения следует осуществлять по определенным конструктивным типоразмерам с широкой унификацией деталей, узлов и агрегатов с целью создания гибкого производства.

Создание автоматизированного оборудования следует осуществлять не по единичным проектам, а перейти к проектированию базовых образцов, на основе которых можно воспроизводить на предприятиях отрасли оборудование для обработки и сборки изделий аналогичных конструкций.

Основным результатом этой работы должны быть сокращение сроков и затрат на создание гибкого автоматизированного оборудования, ускорение обновления автомобильной техники, повышение производительности труда при уменьшении численности рабочих, повышение технико-организационного уровня производства и решение ряда вопросов социальной направленности.

В работе в качестве представителей для рассмотрения возможности создания гибкой автоматизированной линии выбраны общие виды наиболее широко применяемых на автомобилях ведущих шестерен задних мостов для одинарных и двойных передач грузовых автомобилей.

Шестерни одинарной главной передачи могут быть гипоидными или со спиральными зубьями. Спиральные зубья ведущей шестерни имеют левое направление, а ведомой – правое. Ведущую и ведомую шестерни подбирают по контакту в зацеплении и подают на сборку парами.

Двойные главные передачи устанавливают на автомобили большой грузоподъемности и на некоторые автомобили средней грузоподъемности, когда общее передаточное число трансмиссии должно быть значительным. В двойной главной передаче крутящий момент увеличивается последовательно двумя парами шестерен, из которых одна – коническая, а другая – цилиндрическая. Обычно обе пары шестерен устанавливают в общем картере, чтобы большая коническая шестерня сидела на одном валу с малой цилиндрической шестерней.

Рассматриваемые в работе одноименные детали (ведущие шестерни) имеют идентичную конструкцию и для их обработки и сборки может быть создано однотипное оборудование с переналадкой инструментов, определенных элементов установочных приспособлений, ориентирующих и подающих детали в зону обработки.

В связи с необходимостью выполнения комплексной обработки ведущих шестерен главной передачи различных автопроизводителей предусматривается базовая гибкая автоматизированная линия для их обработки. В разрабатываемой линии предусмотрена общая транспортно-накопительная система, автоматическое оборудование и рабочие места для обработки ведущих шестерен, общая система управления. На сборку главной передачи ведущая шестерня в сборе должна поступать комплектом с ранее прикатанными и подобранными по контакту ведущей и ведомой шестернями.

В условиях функционирования группового гибкого автоматизированного производства на первый план выдвигаются определенные требования к конструкции собираемых изделий. При этом необходимо рассматривать два вида требований:

- конструкторско-технологические требования к деталям для обработки по одному групповому процессу с применением однотипных средств технологического оснащения;
- требования к изделиям с возможностью максимальной автоматизации процесса обработки.

Одним из элементов, способствующих успеху создания группового производства, является создание базовой конструкции изделия. В качестве базовой конструкции следует выбирать детали, обладающие наибольшим числом общих признаков, присущих деталям всех видов одного и того же назначения. Остальные конструкции данного вида должны быть модификациями базовой.

Анализ конструкций рассмотренных деталей показывает, что все эти детали спроектированы без учета требований к унификации и взаимозаменяемости, что приводит к увеличению номенклатуры конструкторско-технологических групп изделий одного функционального назначения и усложнению средств технологического оснащения групповых процессов обработки.

Особое значение в условиях группового производства приобретает унификация и типизация отдельных элементов деталей в пределах конструкторско-технологических групп объектов производства. Унификация и типизация должна охватывать и ограничивать применение в конструкциях деталей неунифицированных резьбовых и шлицевых соединений, диаметров отверстий и валов и т.п.

При конструировании деталей одной и той же конструкторско-технологической группы необходимо учитывать идентичность методов достижения точности в процессе образования отдельных поверхностей.

Автоматизация процессов обработки может быть облегчена путем использования прогрессивных загрузочных и контрольных устройств.

Для изделий, объединенных в одну конструкторско-технологическую группу, необходимо иметь одинаковую схему базирования деталей в приспособлениях. Технологическая база должна обеспечивать достаточную устойчивость и жесткость установки детали, что достигается соответствующими размерами и качеством базовых поверхностей детали, а также их взаимным расположением. При построении маршрута обработки следуют соблюдать принцип постоянства баз. На всех операциях в качестве технологических баз необходимо использовать одни и те же поверхности детали. Выполнение этого требования особенно важно при обработке на автоматизированной линии, где каждое изменение положения детали влечет за собой введение дополнительных устройств линии, а также нарушает однотипность конструкций приспособлений.

Для автоматической обработки деталям необходимо придавать простые и симметричные формы. Это упрощает ориентацию заготовок при выдаче их из бункерно-ориентирующих устройств на рабочую позицию автоматического оборудования. Ориентация, то есть придание заготовкам вполне определенного положения в пространстве – это основной первоначальный и наиболее сложный этап автоматической установки с помощью манипулятора. Главные факторы, определяющие сложность автоматического ориентирования заготовок в бункерно-ориентирующих устройствах, это число осей и плоскостей симметрии, которые имеет деталь, и соотношение ее габаритных размеров. Задача автоматической ориентации деталей часто затрудняется или становится невозможной в тех случаях, когда несимметричность выражается слабо различимыми внешними признаками. Для улучшения ориентации таких деталей их конструкцию изменяют, предусматривая уступы, срезы, дополнительные отверстия и другие элементы.

Гибкую автоматизированную линию для обработки шестерен главных передач предлагается оснастить устройствами, автоматизирующими подачу, ориентацию и установку ведущей шестерни. Автоматизировать на линии также операции по контролю биения фланца ведущей шестерни и клеймению.

Линия обеспечивает выпуск пяти различных типов шестерен главных передач с возможностью перехода на другие типы.

Порядок запуска различных типов шестерен на обработку решался с помощью метода ветвей и границ. Процесс решения задачи применительно к определению оптимального порядка запуска основан на переходе от множества всех последовательностей обработки различных типов шестерен к более мелким подмножествам и вычисления для каждого из них нижней границы затрат времени на переналадку. Все множества последовательностей запуска изделий представляются в терминологии теории графов вершиной дерева, подмножества – узлы

дерева, а процесс разделения подмножеств – его разветвлением. Задача решается путем преобразования матрицы и построения графа.

Полученная последовательность переналадок при запуске на обработку у пяти типов главных передач обеспечивает минимальные затраты на переналадку.

На проектируемой переменнo-поточной линии со сменой вида изделий без переходящих заделов при определении оптимального объема запускаемых партий шестерен принималось, что потери времени на переналадку при переходе от обработки одного типа к другому должны

быть минимальными: $f(x) = \sum_{i=1}^m t_{\text{при}}(r_i) \rightarrow \min$, где $t_{\text{при}}(r_i)$ - время простоя линии из-за переналадок в зависимости от ритма r_i выпуска i -го изделия.

$r_i \geq t_i / q_i$, где r_i - ритм выпуска i -го изделия; t_i - время сборки i -го изделия; q_i - количество i -х изделий в группе.

При смене типа изделий на линии без переходящих заделов валы-шестерни снимаются с линии в полной степени готовности. В целях уменьшения потерь времени при смене изделий производства был выбран параллельный вид запуска. Запуск очередной партии осуществляется по мере освобождения рабочих мест от предыдущих изделий.

Одним из наиболее сложных этапов проектирования технологических процессов является расчет реальной производительности оборудования с учетом надежности его работы. Если оборудование на какой-то позиции не обеспечивает заданной производительности, то встает вопрос: что более выгодно – повысить надежность оборудования на этой операции или изменить структуру линии, введя дополнительный поток на данном участке линии.

В ходе проектирования рассматривается работа лимитирующего участка линии как системы, состоящей из комплектующих элементов, для каждого из которых известны средняя

наработка на отказ $t_{\text{раб}_i}$ и среднее время восстановления $t_{\text{рем}_i}$ ($i=1 \dots N$).

Если необходимо повысить надежность позиции линии до заданного значения повышением надежности комплектующего позицию оборудования, то используется метод уравнивания чувствительности по этим узлам.

Чувствительностью станка по i -му узлу называется скорость изменения вероятности безотказной работы станка в зависимости от изменения его стоимости C при условии изменения этих величин только за счет вероятности безотказной работы i -го узла. Чувствительность станка по i -му узлу будет:

$$l_i = \frac{P(\ln \frac{1}{P_i})^{a_i + 1}}{a_i C_{o_i} (\ln \frac{1}{P_{o_i}})^{a_i}}$$

Принятый метод уравнивания чувствительности станка по отдельным комплектующим узлам заключается в определении того, как будет изменяться вероятность безотказной работы станка в зависимости от изменения его стоимости при изменении вероятности безотказной работы любого из основных комплектующих узлов.

Это дает возможность оценить пропускную способность каждой операции технологического процесса, выполняемого на переменнo-поточной линии со сменой вида изделий, чтобы добиться заданной производительности.

Таким образом в статье рассмотрен вопрос повышения эффективности ГПС на основе выбора оптимального компоновочного решения, позволяющего обеспечить минимум приведенных затрат при наиболее целесообразных надежности и производительности линии.

Литература

1. *Елхов П.Е., Бухтеева И.В.* Повышение эффективности загрузки оборудования гибкой автоматизированной линии с помощью статистического моделирования. // Транспортное дело России. - 2013. - №5.
2. *Копылов Л.В., Дмитриев Ю.М., Петухов С.Л.* Оптимизация качества продукции с позиций экономической эффективности производства. // Известия МГТУ «МАМИ». 2013, Т.2. - №1(15).

УДК 621.77**ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРУТКОВ**

Наталья Сергеевна Подкина

*Студент 4 курса**Кафедра «Динамика и прочность машин»**Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет**Научный руководитель: Е.В. Кузнецова**Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»*

Прутковые изделия изготавливаются с применением методов обработки металлов давлением, а именно, волочением, которое в свою очередь сопровождается пластическим деформированием, где реализуются большие степени деформации. Остаточные напряжения при этом в некоторых случаях могут превышать физический предел текучести или прочности материала, что может привести к изменению размеров или даже к разрушению. На рисунках показаны латунный пруток и арматурная проволока, разрушившиеся от действия остаточных напряжений возникших после волочения [1].

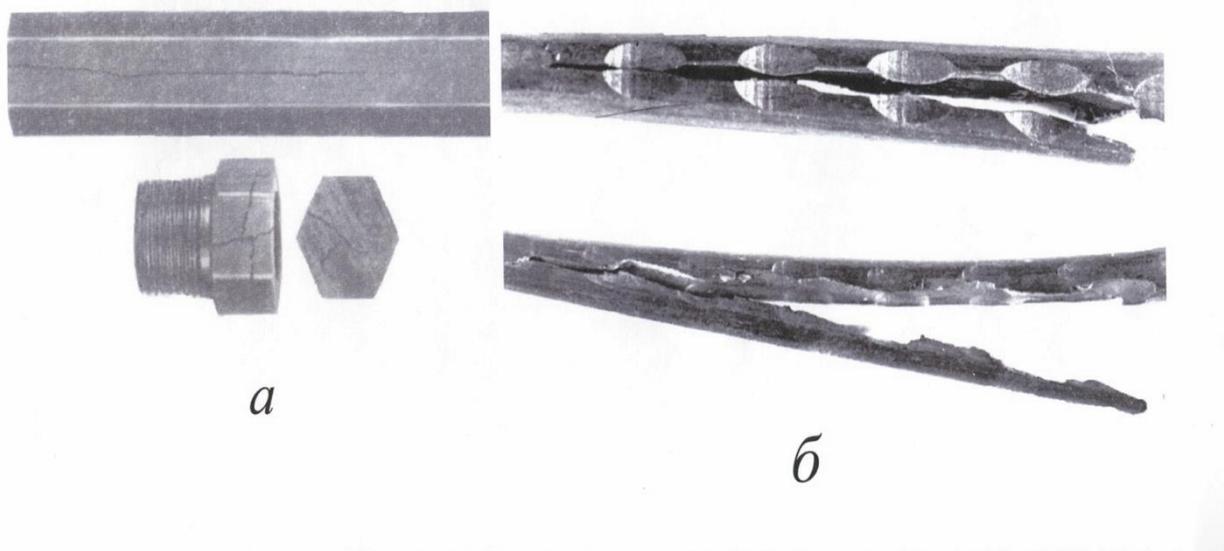


Рис. 1. Продольные и поперечные трещины на латунном прутке от действия остаточных напряжений—*а*; *б*— разрушение арматурной проволоки от действия остаточных напряжений.

При холодном пластическом деформировании осесимметричных изделий реализуется схема (см. рис.2) плоского деформированного состояния, которое описывается уравнениями и соотношениями теории упругости в цилиндрических координатах. Мы ограничимся таким

видом деформации тел вращения, при котором распределение напряжений не зависит от угла θ , а также принимаем, что трубы достаточно длинные. Таким образом, система после принятых допущений принимает такой вид [2]:

Уравнения равновесия в цилиндрической системе координат:

$$\left. \begin{aligned} r \frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{d}{dr}(r\tau_{rz}) &= 0 \\ \frac{d}{dr}(r\sigma_r) - \sigma_\theta + r \frac{d\tau_{rz}}{dz} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

В условиях осевой симметрии для плоскодеформированного состояния принимаем допущения:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = 0; \quad \frac{d\tau_{rz}}{dr} = 0; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dr}(r\tau_{rz}) &= 0 \\ \frac{d}{dr}(r\sigma_r) - \sigma_\theta &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

В работе [3] показана методика нахождения расчетных формул для определения радиальных σ_r , окружных σ_θ и осевых σ_z остаточных напряжений, где осевые напряжения задаются в виде ряда:

$$\sigma_z = a_0 + a_1 r, \quad (5)$$

далее из условия самоуравновешенности определяются константы:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} \sigma_z r dr d\theta = 0, \quad (6)$$

$$a_0 = -\frac{a_1 R_0^2}{2}. \quad (7)$$

Из обобщенного закона Гука определяются упругие деформации (для длинных изделий осевые деформации нулевые) :

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_r + \sigma_\theta)] = 0, \quad (8)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu (\sigma_z + \sigma_\theta)], \quad (9)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu (\sigma_r + \sigma_z)]. \quad (10)$$

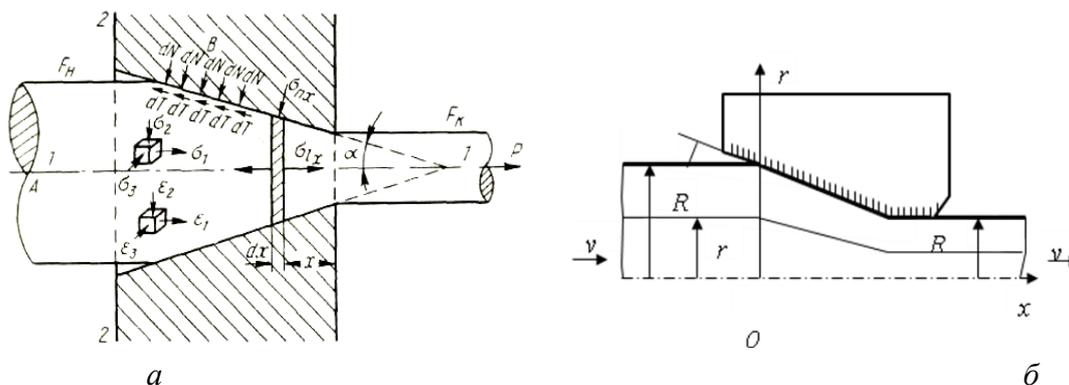


Рис. 2. Процесс волочения прутковой заготовки через коническую матрицу – а; б – схема волочения.

Применим к определению остаточных напряжений энергетический подход. В работе использовалась методика, с применением энергетического подхода, где потенциальная энергия упругих остаточных напряжений рассматривается как часть энергии, пошедшей на пластическое деформирование, $U = \psi U_d$, где ψ – параметр, определяющий долю энергии пластического деформирования, пошедшую на формирование остаточных напряжений; U_d – энергия пластического деформирования [3]

$$U = \psi U_d \quad (11)$$

$$U = \frac{1}{2} \int \sigma_{ij} \epsilon_{ij} dV \quad (12)$$

$$U_d = S_{сеч} \int_0^\epsilon \sigma_s d\epsilon \quad (13)$$

где U – потенциальная энергия упругих остаточных напряжений; U_d – энергия, затраченная на пластическую деформацию заготовки; $S_{сеч}$ – площадь сечения заготовки; σ_s – сопротивление деформации материала заготовки, $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}$ – компоненты тензора остаточных напряжений и упругих деформаций от их действия, соответственно.

Решая, систему уравнений с учетом допущений, используя полуобратный метод теории упругости, (т.е. часть решения задаем сами, а часть находим из уравнений и соотношений теории упругости). Задается осевое напряжение в виде ряда, и с учетом обобщенного закона Гука определяются упругие деформации от действия остаточных напряжений находятся выражения для определения радиальных окружных и осевых остаточных напряжений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\bar{a}_1}{4\mu} (\bar{r}^2 - 1) \\ \sigma_\theta &= \frac{\bar{a}_1}{4\mu} (3\bar{r}^2 - 1) \\ \sigma_z &= \frac{\bar{a}_1}{2} (2\bar{r}^2 - 1) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где \bar{a}_1 – параметр, характеризующий распределение остаточных напряжений по сечению прутка и находится из энергетического условия (11) и послеупрощений имеет вид:

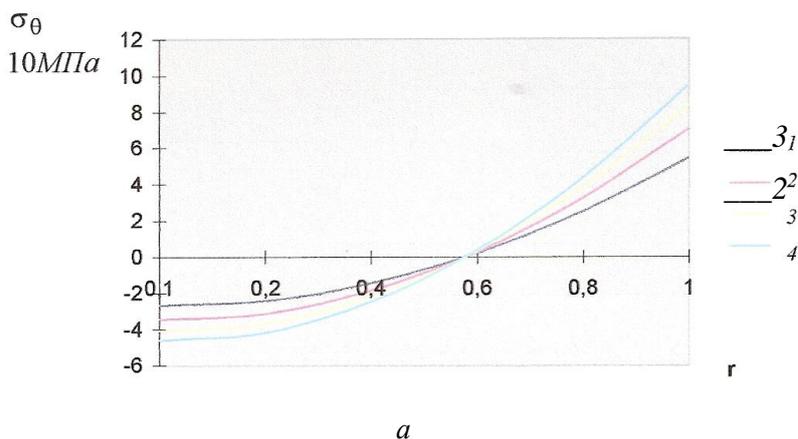
$$\bar{a}_1 = \sqrt{\frac{\psi \sigma_{s_0} E 24 \mu^2}{1 - \mu^2} \epsilon_{ср} \left(1 + \frac{m \epsilon_{ср}^n}{(n+1)} \right)}. \quad (15)$$

где ψ – параметр деформативности, характеризующий механические свойства обрабатываемого материала [4]. Степень пластической деформации прутка ε_{cp} , где d, d_0 – диаметры заготовки (прутка, проволоки) до и после пластической деформации; α – угол наклона образующей матрицы [5].

$$\varepsilon_{cp} = 2 \ln d / d_0 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha, \quad (16)$$

Приведенная методика применена для расчета технологических остаточных напряжений в прутках диаметром 8 мм, при $\mu = 0,32$; $d / d_0 = 1,2$; $\psi = 0,004$; $\alpha = 8^\circ$. Результаты расчета показали (см. рис. 4), что радиальные напряжения на поверхности отрицательные, что подтверждается известными из литературы закономерностями формирования остаточных напряжений [1]. Окружные и осевые остаточные напряжения растягивающие на поверхности и сжимающие в центре прутка, при этом окружные растягивающие напряжения достигают на поверхности 100 МПа, что является опасным для циркониевых сплавов, так как многие свойства циркония схожи со свойствами меди.

Из циркониевых прутков, выдавленных или катаных заготовок можно тянуть прутки и проволоку. Параметры волочения циркония обычно сравнивали с параметрами волочения нержавеющей стали, хотя в настоящее время механические свойства циркония значительно приблизились к свойствам меди. Прутки волочат, используя специальные смазки с обжатиюми за проход 10-15 % с суммарным обжатием между отжигами до 60 %. Обычно нужно волочить проволоку с обжатием по калибру 1/2 (за проход 10%) и суммарным обжатием до отжига примерно 50%. Также проволочат проволоку до меньших размеров (диаметром менее 0,76 мм) без отжига неограниченно [6]. Для циркония применяют стандартные волокнистые материалы из стали или карбидов. Карбидные волокнистые материалы значительно уменьшают проблему трения и износа.



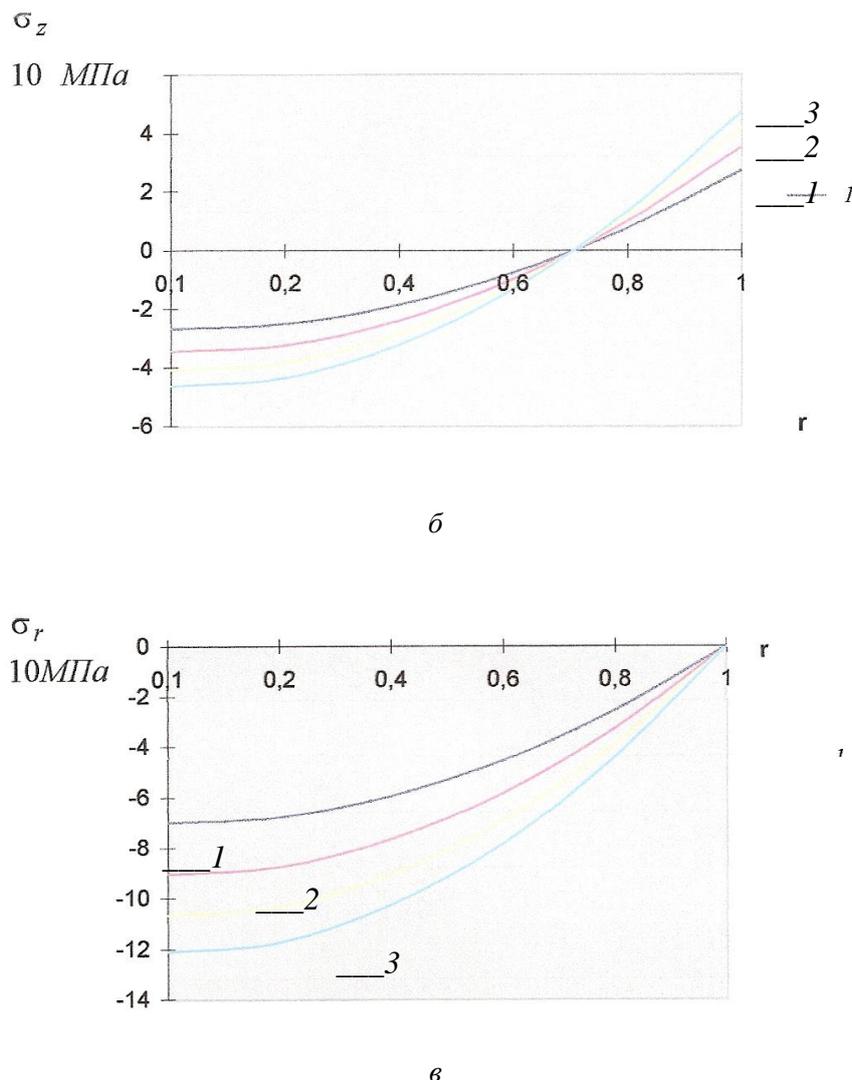


Рис. 3. Распределение a – окружных, b – осевых и $в$ - радиальных напряжений по объему прутков из 1 – иодидного циркония, 2 – цирконя, 3 – сплава циркония с 2,5% ниобия.

В работе рассмотрены актуальные вопросы возникновения технологических остаточных напряжений и упругих деформаций в прутковых изделиях, произведенных волочением. Методика определения остаточных напряжений, основанная на энергетическом подходе применена для расчета технологических остаточных напряжений в прутках из различных циркониевых сплавов. Результаты расчета показали, что радиальные напряжения на поверхности отрицательные, что подтверждается известными из литературы закономерностями формирования остаточных напряжений. Окружные и осевые остаточные напряжения растягивающие на поверхности и сжимающие в центре прутка.

Литература

1. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981.-96 с.
2. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970.-940 с.
3. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. –Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. –2012. –226.

4. Пат. 2128329 РФ. Способ определения показателя деформированности материала / Колмогоров Г.Л., Мельникова Т.Е., Курапова Н.А.; заявитель и патентообладатель Перм. гос. тех. ун-т. –Бюл. №9 от 27.03.1999.
5. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. О степени деформации при осесимметричном деформировании // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2000. –№11. –С.31– 33
6. Меерсона Г.А. Металлургия циркония. –М.: Изд-во ИЛ, 1959.

УДК 621.9.067:658.512.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МЕХАНОСБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сергей Викторович Сакулин, Святослав Васильевич Тагильцев

Студенты 6 курса

кафедра «Технология машиностроения»

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.И. Усачев

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»

В настоящее время одной из проблем на заключительном этапе технологической подготовки производства является сложность разработки планировок автоматизированных участков при реконструкции или проектировании новых механосборочных производственных систем. Решение этой проблемы нашло отражение в использовании программных продуктов, обеспечивающих автоматизированную поддержку принятия решений в процессе разработки виртуальных планировок.

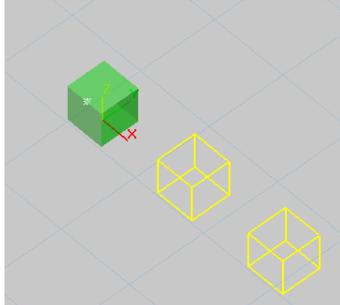
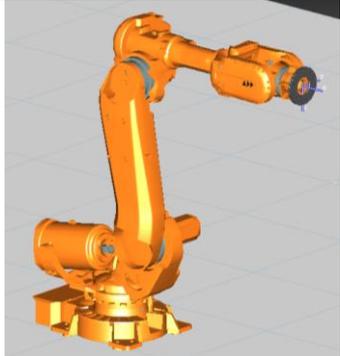
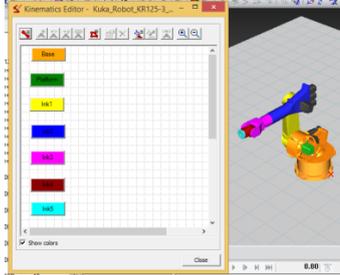
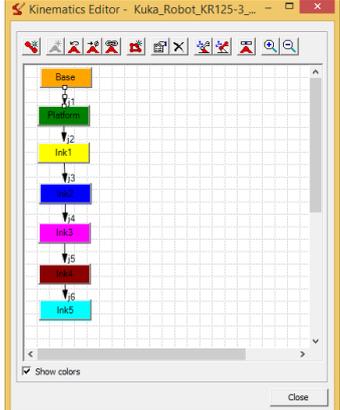
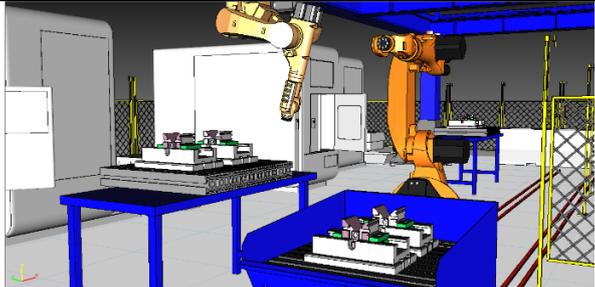
Проведенный анализ отечественных и зарубежных систем проектирования виртуальных планировок по критериям, приведенным в таблице 1 показал, что наибольший интерес может представлять система RobotExpert компании Siemens [1].

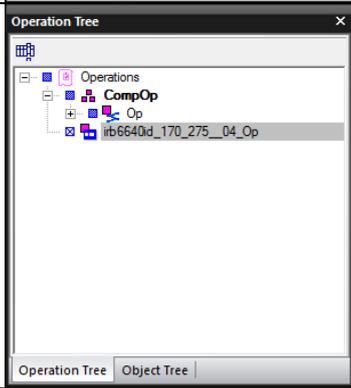
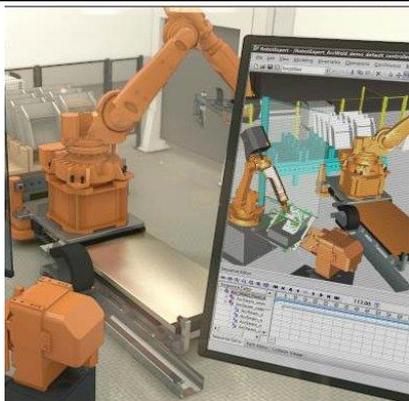
Таблица 1. Характеристика программных продуктов

Продукт \ Критерии	RobotExpert	SprutCAM	DELMIA
1. Функциональность	+	-	+
2. Интеграция с другими системами	+	+	-
3. Сложность освоения	-	+	-
4. Быстродействие	+	-	+
5. Доступность (наличие учебных версий)	+	-	-

Эта система предназначена для выполнения основных функций, представленных в таблице 2.

Таблица 2. Основные функции «Robot Expert»

№	Наименование функций	Графическое представление	Источник
1	3D-моделирование		Модуль Modelling
			Модуль Convert
2	Задание кинематики		Модуль Kinematics Editor
			Модуль Convert
3	Обнаружение столкновений и проверка безопасности протекания ТП		Модуль Operation

4	Точный расчет времени производственного цикла		Модуль Sequence editor
	Offline-программирование		Модуль Path Editor
6	Генерация программы для загрузки ее в реальный контроллер робота		Модуль генерации программы

С целью использования рассматриваемого программного модуля в учебном процессе при изучении дисциплин «Проектирование цехов механосборочного производства» и «Проектирование технологических комплексов» разработана методика выполнения лабораторного практикума [2]. Она содержит следующие этапы: подготовка и анализ исходных данных: аналитические расчеты параметров участка; разработка виртуальной планировки; имитационное моделирование с анализом результатов исследования структурных и параметрических характеристик участка: уточнение параметров участка с доработкой планировки.

Рассмотрим один из вариантов проектирования, исходные данные для которого приведены в таблице 3. По ним определяются параметры автоматизированного участка обработки деталей типа «диск», такие как количество оборудования каждой группы, характеристики автоматизированной складской системы, отделения комплектации технологической оснастки, вспомогательных подсистем, общая площадь.[4,5].

Результаты аналитических расчетов параметров участка следующие :

Общее количество установленного оборудования – 7 станков: из них станков токарной, фрезерной, шлифовальной групп – 2,3,2 соответственно.

Число ячеек стеллажа-накопителя – 46.

Число позиций загрузки-разгрузки – 1.

Общее количество средств для транспортирования деталей и инструментов – 2.

Количество элеваторных стеллажей участка комплектации технологической оснастки – 1. Общая площадь участка – 301м².

Таблица 3. Исходные данные

Номер детали	Объём выпуска, шт. в год	Станкочёмкость обработки деталей для групп оборудования			Размер партии	T _{п-3} , мин
		1	2	3		
		Токарная	Фрезерная	Шлифовальная		
		T _ш , мин	T _ш , мин	T _ш , мин		
1	1650	0	14,7	5,76	34	51
2	2950	19,5	9,8	11,52	34	51
3	2850	0	24,5	42,24	34	51
4	752	35,1	0	19,2	34	51
5	840	23,4	24,5	0	34	51
6	4200	11,7	39,2	14,4	34	51
7	2310	19,5	0	28,8	34	51
8	4130	0	37,24	0	34	51

С учетом полученных данных разработана виртуальная планировка автоматизированного участка (рис.1)

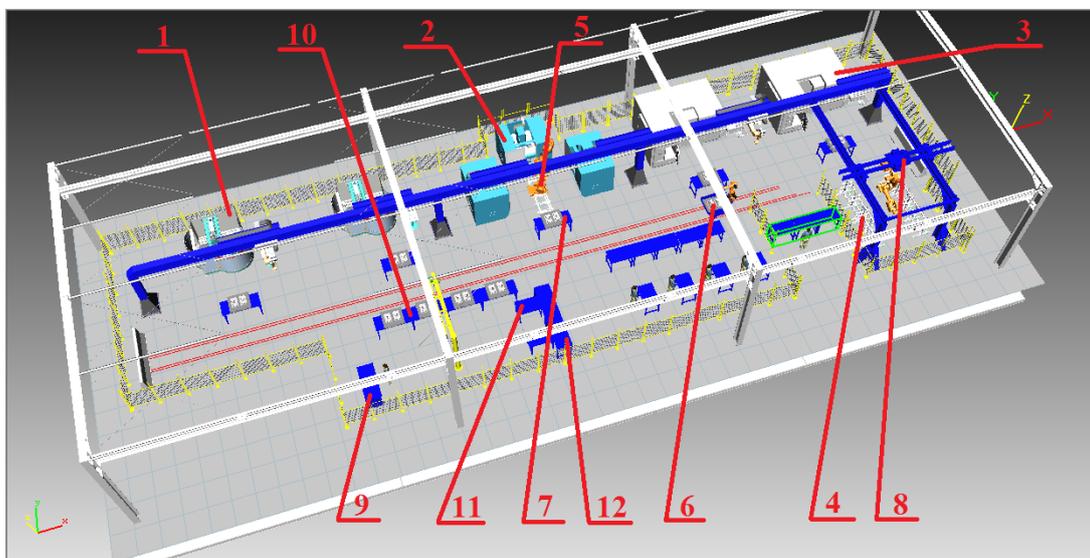


Рис. 1. Виртуальная планировка автоматизированного участка обработки группы деталей типа «диск».

1-токарно-винторезный ГПМ на базе станка мод. 1SE520; 2-вертикально-фрезерный ГПМ на базе станка мод. F100, 3-круглошлифовальный ГПМ на базе станка мод. MKS 1332; 4-склад; 5-манипулятор; 6-транспортная тележка; 7-накопитель; 8-кран штабелер; 9-слесарный верстак; 10-накопитель; 11-стелаж приспособлений, 12-стелаж инструмента

Для данной планировки проводится имитационное моделирование с использованием системы Tecnomatix Plant Simulation с целью выявления «узких» мест в производственной цепи изготовления заданных предметов производства (рис. 2.) [3]

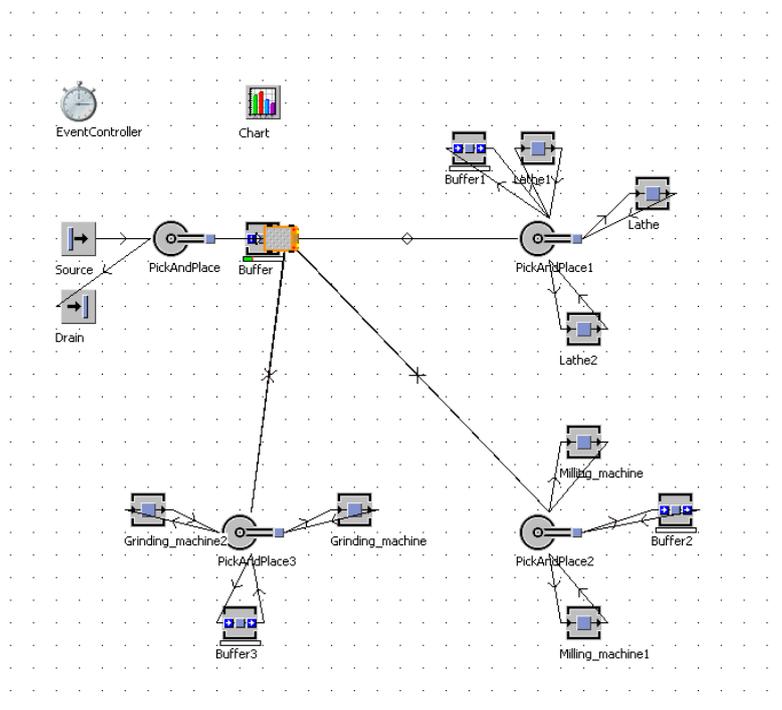


Рис. 2. Имитационная модель автоматизированного участка обработки группы деталей типа «диск»

Наглядное сравнение загрузки каждой единицы технологического оборудования представляется в виде гистограммы (рис.3).

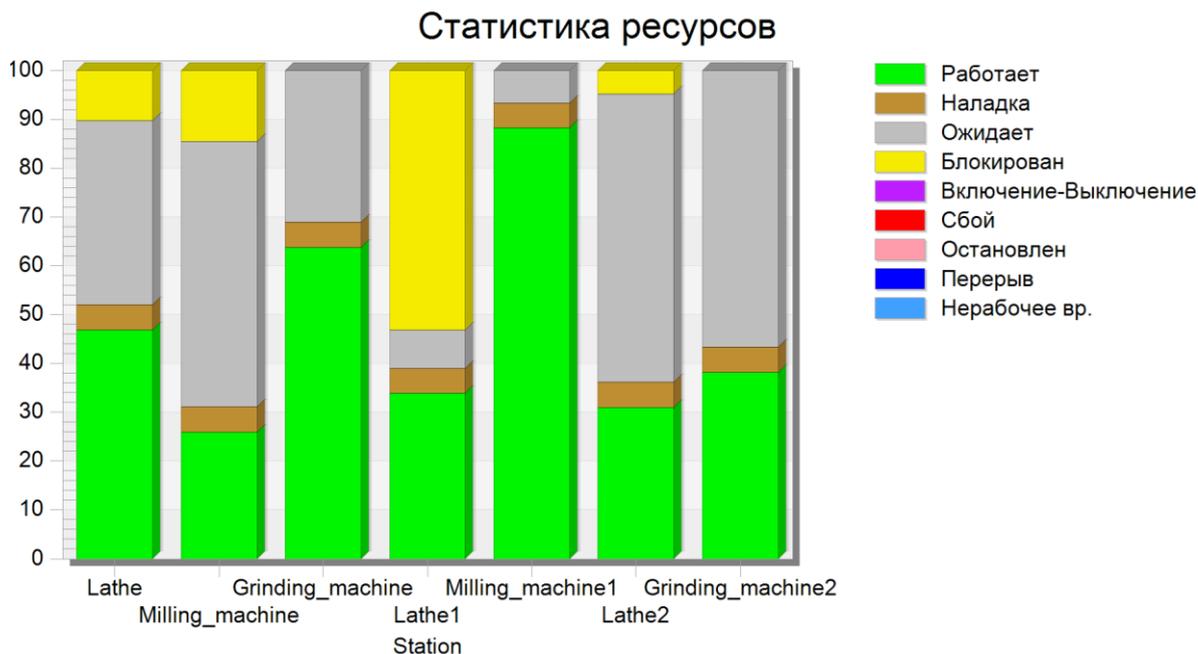


Рис. 3. Гистограмма загрузки технологического оборудования

Анализ результатов моделирования показал, что время простоя станков (ожидание + блокировка) соизмеримо со временем обработки деталей. Установлено, что производительность участка может быть повышена за счет увеличения суммарной емкости накопителей на 12 ячеек. Это приводит к сокращению времени простоев токарных станков на 14,16% ,15,73% соответственно, фрезерных станков – на 15,42% ,14,76% и 16,34% соответственно; шлифовальных станков на 21,56% и 22,34% соответственно. Производительность механического участка после оптимизации возросла на 27,4%.

Выводы.

Использование программного модуля RobotExpert позволило разработать комплекс лабораторных работ, при проведении которых решается проблема разработки виртуальных планировок, дающих наибольшее представление о технологическом комплексе.

В процессе подготовки методических материалов лабораторного практикума создана база данных технологического оборудования, содержащая значительное количество 3-D моделей, обеспечивающих многовариантное проектирование участков.

Имитационное моделирование автоматизированных участков с применением системы Tecnomatix Plant Simulation позволяет уточнять планировочные решения за счет оптимизации технологических параметров проектируемых комплексов.

Литература

1. Усачев Ю.И., Сакулин С.В., Тагильцев С.В. Компьютерное моделирование производственных систем с использованием программного модуля «RobotExpert» - журнал «Вестник науки и образования», №2, 2014 г., стр. 16-18.
2. Усачев Ю.И., Сакулин С.В., Тагильцев С.В. Визуализация технологических комплексов механосборочного производства на этапе проектирования (лабораторный практикум) – журнал «Молодой ученый», № 5 часть II, 2015 г, стр. 194-196.
3. Программный модуль Robot Expert. [Электронный ресурс]: библиотека ПО компании Siemens. URL: http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/products/tecnomatix/robotics_automation/robotexpert.shtml (дата обращения 12.01.2015).
4. Мельников Г.Н., Вороненко В.П. Проектирование механосборочных цехов, М.: Машиностроение, 1990 г.352с.
5. Усачев Ю.И. Анализ производительности работы автоматизированных участков – журнал «Главный механик», №9, 2014г.стр. 47-52

УДК 621.757

РАЗРАБОТКА ХАРАКТЕРИСТИК АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ СБОРКИ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ АВТОМОБИЛЕЙ

Михаил Юрьевич Шариков⁽¹⁾, Георгий Юрьевич Горбатенков⁽²⁾

Студент 5 курса^{(1),(2)}

кафедра «Технология машиностроения»

Московский государственный технический университет (МАМИ)

Научный руководитель: И.В. Бухтеева

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»

Современное сборочное производство проявляет особое внимание к техническим направлениям, способствующим повышению эффективности сборки и качества выпускаемой продукции. Одним из таких направлений является внедрение многономенклатурных, быстро перенастраиваемых автоматизированных модулей, робототехнических комплексов, гибких транспортных систем, автоматизированных складов.

Гибкая сборка включает в себя использование промышленных роботов, хотя в некоторых случаях для ее осуществления достаточно установить манипуляторы, выполняющие операции типа «взять – установить» с цикловым управлением. Тип применяемого оборудования зависит от программы выпуска, размеров собираемых узлов и требуемой степени гибкости.

Цель большинства технологических комплексов, устанавливающих роботизированные сборочные системы, состоит в резком сокращении расходов и времени на замену оснастки, выполняемую при переходе на другую модель собираемого изделия. Громадный потенциал в области гибкой автоматизации сборочных работ требует использования автоматических манипуляторов с программным управлением – промышленных роботов на операциях сборки узлов, трудоемкость которых в общем объеме трудовых затрат по выпуску автомобиля составляет 25...30%. Создание робототехнических сборочных комплексов существенно повышает уровень автоматизации сборочного производства.

В автомобильной промышленности нередко меняются модели выпускаемого изделия спустя всего полгода после начала ее производства, иногда ограничиваются только незначительными модификациями. В этом случае целесообразно использование сборочных модулей, обеспечивающих быструю переналадку на сборку заданной номенклатуры изделий. Значительно легче автоматизировать не всю сборочную линию, а только отдельные сборочные модули.

При создании роботизированного технологического комплекса сборки валов необходимо правильно выбрать тип робота-манипулятора и накопителя, разработать конструкции захватов, связать манипулятор с обслуживаемым технологическим оборудованием, создать систему блокировки и т.д. Процессы сборки валов отличаются высокой стабильностью и сравнительно небольшим временем цикла.

При сборке сложных узлов, таких как коробка передач, раздаточная коробка задача выбора манипулятора усложняется. Для сборки таких узлов необходимо определить наличие базовой детали и надежных установочных поверхностей у составляющих сборочных единиц. Например, у раздаточной коробки базовой деталью является картер, который объединяет все детали и сборочные единицы. Основное количество деталей устанавливается с одной стороны. Удобство установки деталей и контроля выполнения сборочных операций объясняется тем, что в начале процесса сборки, она ведется в вертикальном направлении, при этом сила тяжести помогает удерживать сопрягаемые детали и сборочные единицы. Большинство деталей и сборочных единиц устанавливаются без специального контроля, качество соединения определяется визуально и путем перемещения сопрягаемых деталей вручную относительно друг друга. Наличие множества сборочных единиц в конструкции раздаточной коробки позволяет подавать на общую сборку меньшее число комплектующих изделий и позволяет повысить качество выполнения сборочных соединений. Возможность применения простых технических средств механизации и автоматизации сборки обусловлено тем, что при сборке раздаточной коробки выполняются резьбовые и прессовые соединения, для этого используются многошпиндельные гайковерты и прессы. В процессе сборки раздаточной коробки три раза производится смена баз.

Анализ схем сборки узлов коробки передач показал, что вся сборка осуществляется по трем направлениям, что позволяет выбрать направление действия усилий (вертикальное, горизонтальное, наклонное); геометрические характеристики траектории движения робота (величина хода, сопряжения, радиус поворота, угол поворота); количество движений робота по установке объекта манипулирования.

Результаты исследований технологических процессов сборки типовых узлов изделий машиностроения показывают, что в большинстве сборочных операций 60% деталей при сборке вводят с одного направления, 20% - с противоположного, 10% - под прямыми углами к этим направлениям и 10% - с других направлений. К типовым операциям при сборке относят: ввод и фиксацию (затяжку) крепежных изделий или заклепок, запрессовку в корпуса подшипников, пальцев и уплотнений, установку небольших корпусов, роторов и статоров, сборку шайб и контактов, нанесение защитных покрытий и смазочных материалов.

Среди типичных изделий, получаемых путем сборки, можно назвать узлы, заменяемые новыми каждые несколько лет, а также такие изделия, как зубчатые передачи, электродвигатели

и генераторы переменного тока, изготовление множества модификаций которых может потребоваться на одной и той же сборочной линии. В результате обследования предприятий сборочного производства установлено, что промышленные роботы могут быть использованы при сборке всех этих узлов. В числе основных сборочных операций, обычно осуществляемых роботами, - подъем собираемой детали в вертикальном направлении, ее горизонтальное перемещение и затем опускание в том же направлении для ввода этой детали в другую. Такие операции следует выполнять быстро и плавно. Таким образом, лучше всего подходит для сборки робот, способный непосредственно обеспечить перемещения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Кроме того, у такого робота должна быть достаточно обширная рабочая зона, а сам он должен иметь предельно малые размеры. Для автоматизации сборочного производства обычно используются автоматические манипуляторы с цикловой системой управления и фиксацией крайних положений рабочих органов по жестким упорам. Рука имеет четыре степени свободы: горизонтальное и вертикальное перемещение, поворот вокруг вертикальной оси и разворот кисти относительно горизонтальной оси. Пятой степенью свободы является движение схвата. При подходе к упорам рабочий орган плавно тормозится гидравлическими или пневматическими демпферами. Приводы перемещения руки, кисти и схвата - пневматические, по вертикали рука перемещается пневмогидравлическим мультипликатором.

При автоматическом режиме работы обеспечивается одно- и многократное воспроизведение цикла, причем в одном цикле может осуществляться до четырех вертикальных и горизонтальных перемещений руки и до трех остальных перемещений, а также подаваться команды на включение и отключение технологического оборудования, работающего в паре с манипулятором. Кроме того, от технологического оборудования могут подаваться команды, подтверждающие в заданные моменты времени готовность оборудования к взаимодействию с манипулятором. Если подтверждающие команды отсутствуют, цикл прерывается и манипулятор останавливается.

Одной из тенденций развития современного роботостроения является создание специализированных конструкций промышленных роботов, не обладающих избыточностью функций и наиболее полно отвечающих требованиям, предъявляемым к выполнению конкретных технологических задач. Предпочтение при этом отдается агрегатно-модульному принципу построения, обеспечивающему минимизацию необходимого количества степеней подвижности робота для выполнения своего функционального назначения. Исполнительное устройство и устройство управления скомпонованы из модулей в соответствии с требуемыми кинематической, энергетической и управляющей схемами, а рабочий орган зафиксирован на унифицированной стыковочной поверхности манипулятора.

Устройства микроэлектроники дают возможность управлять сборочным процессом на всех его стадиях. Роботы в робототехнологических комплексах линий сборки должны определять местонахождение и относительное положение деталей, захватывать и переносить их на требуемую позицию, корректируя по пути относительное положение.

С целью определения требуемых характеристик манипулирующих и захватных устройств, наиболее полно отвечающих требованиям выполнения конкретных сборочных операций, на основе взаимосвязи между конструкцией собираемых изделий и классификационными признаками модульных автоматических манипуляторов, было проведено статистическое обследование сборочных узлов массой до 3,5 кг по конструктивно-технологическим признакам сборки. Статистическому обследованию групп узлов в проведенной работе подвергались те конструктивно-технологические признаки собираемых узлов, которые напрямую связаны с классификационными признаками модульных автоматических манипуляторов: масса; количество деталей или подузлов, входящих в узел; габаритные размеры; расположение деталей в узле (вдоль одной или нескольких осей, вдоль вертикальной, горизонтальной или наклонной осей).

На рисунках 1 и 2 представлены результаты статистического обследования групп узлов автомобилей, а именно распределение собираемых узлов по направлениям сборки и по массе.

Анализ результатов обследования многочисленных сборочных узлов в машиностроении по конструктивно-технологическим признакам показал, что по массе узлы распределяются следующим образом: до 1,6 кг - 72%; от 1,6 до 3,2 кг - 17%, от 3,2 до 6,3 кг - 7%.

Точность установки собираемых деталей характеризуется величинами зазоров, образующихся при сборке, наличием и размером фасок, закруглений на сопрягаемых поверхностях, а также точностью взаимного расположения поверхностей захвата и сопряжения. Исследованием определено, что в большинстве случаев погрешность установки деталей массой до 1,6 кг составляет $\pm 0,05$ мм, деталей свыше 1,6 кг - $\pm 0,1$ мм. В результате анализа операций, связанных с силовым воздействием на собираемые детали, определено, что при установке манжет, колец, уплотнений усилие давления по вертикали необходимо в пределах 150...2000 Н. Анализ показал, что по характеру движений робота 96% операций сборки осуществляется при прямолинейном движении деталей и только 4% - при криволинейном. Более 12% узлов собирается установкой деталей вдоль одной оси (одноосевая сборка), 32% - вдоль двух осей, 55% узлов имеют оси сборки, направленные горизонтально и вертикально, 18% - только вертикально. Результаты анализа операций по количеству движений, соответствующих количеству степеней подвижности модульных автоматических манипуляторов, показали, что более чем в 80% операций сборки необходимы три движения, менее чем в 1% операций - четыре.

Компоновку сборочных систем определяет программа выпуска узлов. Наиболее приемлемым вариантом при гибкой сборке является дифференцированная сборка, при которой модульный автоматический манипулятор выполняет, как правило, одну технологическую операцию. Вследствие этого количество точек, обслуживаемых манипулятором, может быть от 2 до 8. Это обеспечивается при двухточечном позиционировании схвата по каждой из степеней подвижности, осуществляемой по жестким упорам, распложенным в крайних положениях.

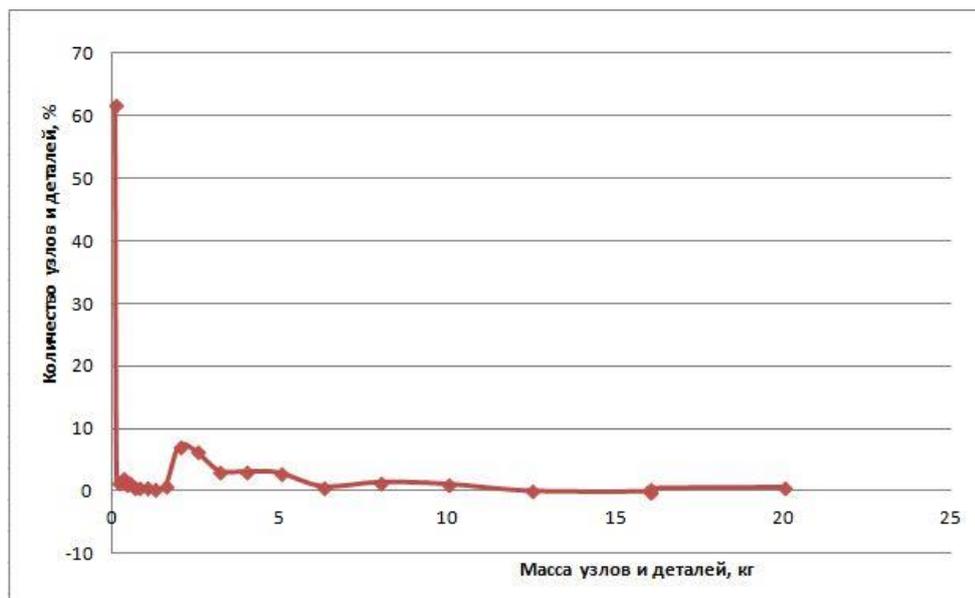


Рис. 1. Распределение собираемых узлов по числу направлений сборки

Анализ собираемых узлов по конструктивно-технологическим признакам позволил определить общие требования к характеристикам агрегатно-модульного автоматического манипулятора. Манипуляторы для сборки валов должны иметь четыре (первый тип) и пять (второй тип) степеней подвижности, номинальную грузоподъемность - 1,6 и 3,6 кг соответственно, погрешность позиционирования деталей массой до 1,6 кг - $\pm 0,05$ мм, деталей

свыше 1,6 кг - $\pm 0,1$ мм. Горизонтальный и вертикальный ход для первого типа манипулятора – 240 мм и 80 мм, для второго типа – 400 и 160 мм, усилие давления по вертикали – 15Н (первый тип) и 30 Н (второй тип).

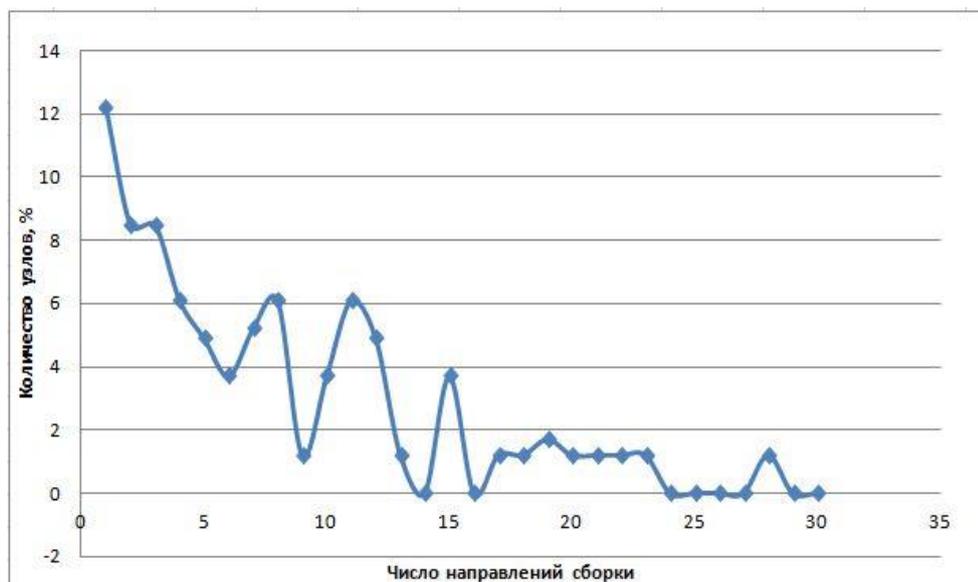


Рис. 2. Распределение собираемых узлов по массе

При выборе компоновки модуля сборки валов решающим стал технологический принцип: оборудование установлено в последовательности технологических переходов, при этом расстояния между оборудованием соответствуют перемещениям рабочих органов манипулятора. В промежуточных накопителях выполняются подготовительные операции по ориентированию деталей перед подачей их в схват манипулятора.

При создании автоматической сборочной позиции необходимо было решить задачу обеспечения безопасности перемещения руки манипулятора в рабочую зону и разработать систему связей манипулятора с обслуживаемым оборудованием. Наиболее опасными являются следующие ситуации: ползун прессы начинает ход вниз раньше, чем рука манипулятора вернется в горизонтальном направлении в исходное положение; рука манипулятора начинает перемещение вперед раньше, чем ползун прессы придет в верхнюю мертвую точку. Для исключения таких ситуаций прессы оснащаются современными устройствами управления, в которых предусмотрены блокировки, исключающие сдвигание ходов ползуна прессы. Для обеспечения безопасности перемещения руки манипулятора в рабочую зону прессы на кривошипном валу устанавливается конечный выключатель, формирующий верхнюю мертвую точку (ВМТ) ползуна, а на манипуляторе установлен конечный выключатель, контролирующий нахождение руки в исходном положении.

Сигналы от этих конечных выключателей использованы для получения команд подтверждения, введенных при программировании работы позиции. Конечный выключатель, установленный на прессе, дает команду на разрешение перемещения руки манипулятора в рабочую зону прессы, а конечный выключатель, установленный на манипуляторе, разрешает перемещение ползуна прессы вниз.

Программирование работы позиции заключается в задании последовательности движений рабочих органов манипулятора, включений и выключений обслуживаемого технологического оборудования, а также временных интервалов между началом каждого движения.

При агрегатно-модульном построении функциональные узлы автоматического манипулятора создаются на агрегатной основе и на их базе возможна разработка различных компоновочных схем. К этим модулям предъявляются требования:

- законченность и конструктивная самостоятельность;
- прочность и жесткость в соответствии с проектными нормативами;
- возможность компоновки в различных сочетаниях и положениях, простота и надежность монтажа;
- унификация стыковочных элементов узлов одинакового назначения (унификация узлов в пределах смежных типоразмеров и между отдельными типажам модулей).

Необходимо создать гамму модулей, отличающихся грузоподъемностью и включающих модули поворота, горизонтальных и вертикальных перемещений, сдвига и ротации захвата, механических, электромагнитных и вакуумных схватов.

Привод преобразует сигналы, поступающие от системы управления, в механические перемещения исполнительных звеньев. Различают электрический, пневматический, гидравлический типы приводов и их комбинации.

При необходимости двухточечного позиционирования исполнительного звена манипулятора по каждой из степеней подвижности наиболее целесообразным является использование пневматического привода. При наличии централизованной системы подачи воздуха следует учитывать также такие преимущества пневматического привода, как дешевизна, простота конструкции, высокая надежность, пожаробезопасность. В качестве приводных элементов используются пневмоцилиндры диаметром 20, 32, 40 и 50 мм. Номинальное расчетное давление сжатого воздуха, необходимое для надежной работы модулей, 0,4...0,45 МПа.

Модули линейных перемещений включают модули горизонтальных, вертикальных перемещений и модули сдвига. Линейные перемещения возможны с использованием различных кинематических схем. При выборе конструктивной схемы основным условием является обеспечение максимальной жесткости системы в вертикальной плоскости.

К модулям вращения относятся модули поворота и ротации захватов. Эти модули можно выполнить по двум различным конструктивным схемам: с использованием линейного пневмоцилиндра, обеспечивающего заданный угол поворота через реечно-шестеренчатую передачу, и в виде неполноповоротного пневмоцилиндра, поршень которого имеет прямоугольную форму и снабжен фторопластовым уплотнением.

Для торможения выходного звена автоматического манипулятора в конечных положениях при подходе к упору наибольшее распространение получили гидродемпферы. Изменение скорости перемещения подвижного звена модулей осуществляется путем регулировки дросселя. Возможен также вариант торможения исполнительных звеньев модулей с использованием торможения противодавлением.

Кинематическая схема робота разрабатывается в следующей последовательности:

- определяем оптимальное передаточное отношение по каждой степени подвижности;
- выбираем из принятых передаточных отношений и компоновочного чертежа тип кинематических элементов передач, и разбиваем передаточное отношение по элементам кинематической цепи;
- исходя из компоновочного чертежа и передаточных отношений, определяем тип кинематических связей между приводом и входным элементом передаточного механизма.

Особенностью работы роботов являются динамические нагрузки и большие зоны малых перемещений. Поэтому для определения оптимального передаточного отношения необходимо учитывать, что с увеличением передаточного числа i уменьшается J_n , что приводит к резкому уменьшению времени разгона. С другой стороны уменьшается максимальная скорость установившегося движения. Передаточное отношение выбирают из условия минимума времени перемещения по степени подвижности. Передаточное отношение механических перемещений представляет собой зубчато-реечный механизм со следующими данными:

Z – число зубьев рейки;

t – шаг рейки;

S – длина рейки.

Расчет захватного устройства (ЗУ) включает проверку на прочность деталей захвата. Кроме того, необходимо определить силу привода ЗУ, силу в местах контакта заготовки и губок, проверить отсутствие повреждений поверхности заготовки или детали при захватывании, возможность удержания захватом детали при манипулировании, особенно в моменты резких остановок.

Усилие захватывания определяют из предположения, что удержание объекта манипулирования происходит за счет сил трения, создаваемых этим усилием:

$$F = m(g + a)K_1K_2$$

где m – масса объекта манипулирования; a – максимальное ускорение центра масс объекта манипулирования, м/с³; K_1 – коэффициент, зависящий от положения заготовки по отношению к губкам схвата и направления действия сил тяжести; $K_2 = 1,3 \dots 2,0$ – коэффициент запаса (большое значение K_2 берут для схватов, в которых отсутствует самоторможение).

Коэффициент K_1 зависит от положения объекта манипулирования по отношению к губкам схвата и направления действия сил тяжести.

Губки схвата контактируют с деталью, и от их конструкции во многом зависит точность и надежность работы схвата.

Поперечное сечение рычага схвата рассчитывают на изгиб. Опасным сечением обычно является место установки шарнира:

$$\sigma_n = \frac{10^3 M_u}{W} \leq [\sigma]_n$$

где M_u – изгибающий момент, действующий в опасном сечении, Нм; W – момент сопротивления сечения изгибу, мм³; $[\sigma]_n = (0,4 \dots 0,5) \sigma_T$ – допускаемое напряжение изгиба, МПа.

Рассчитывается схват по следующим характеристикам: масса объекта манипулирования, максимальное ускорение схвата (5 м / с²). Диаметр объекта манипулирования может колебаться от 60 до 200 мм.

Так как схват может занимать как вертикальное, так и горизонтальное положение, принимаем способ удержания заготовки за счет сил трения с базированием призмами. Учитывая, что материал переносимых схватом деталей, как правило, сталь, принимаем тип схвата механическим. Схват должен обеспечивать большой диапазон перемещений. Ввиду высоких требований к точности установки принимаем схему, обеспечивающую поступательное перемещение губок, и, следовательно, точное базирование удерживаемой детали в осевом направлении при различных ее диаметрах.

Диаметр поршня привода схвата определяют из соотношения:

$$d = \sqrt{\frac{4F_n}{(\pi P \eta_n \eta_c)}}, \text{ (мм)}$$

где F_n – усилие привода схвата, Н; P – давление энергоносителя (для пневмопривода 0,4 МПа, для гидропривода 3 ... 12,5 МПа); η_n, η_c – к. п. д., схвата и привода ($\eta_c = 0,9 \dots 0,95, \eta_n = 0,85 \dots 0,95$).

Усилие привода:

$$F_n = F \cdot i, \quad \text{где } i = \frac{2l \cos Q}{R}$$

Из конструктивных соображений принимаем $l = 150$ мм.

Угол Q определим исходя из максимального перемещения:

$$S = \frac{(D_1 - D_2)}{2} + \Delta = \frac{(200 - 60)}{2} + 20 = 90 \text{ мм}$$

где $D_1 = 200$ мм – максимальный диаметр удерживаемой детали; $D_2 = 60$ мм – минимальный диаметр; $\Delta = 20$ мм – дополнительный ход, необходимый для выхода призмы от поверхности заготовки:

$$Q = \frac{S}{l} = \frac{90}{150} = 0,6; Q = 34^\circ 22' 39''$$

Радиус зубчатого колеса определяется из расчета зубчато-реечной передачи на изгиб:

$$m = 14 \cdot \sqrt[3]{\frac{y_F K_{F\beta} F}{Z^2 \psi_{bd} \sigma_{FP}}}$$

где $Z = 30$ – число зубьев; $y = 4,26$ – коэффициент формы зуба; $\psi_{bd} = \frac{b}{d} = 0,6$ – коэффициент ширины венца; $K_{F\beta} = 1,08$ – коэффициент, учитывающий распределение нагрузки по ширине венца; $\sigma_{FP} = 320$ Мпа - допускаемое напряжение при расчете зубьев на изгибную прочность (сталь 40ХН, термообработка поверхности токами высокой частоты $K_{F\beta} = 1$).

Принимаем $m = 5$ мм., тогда:

$$R = \frac{mz}{2} = \frac{5 \cdot 30}{2} = 75 \text{ мм}; F_n = \frac{2Fl \cos Q}{R} = \frac{2 \cdot 3000 \cdot 150 \cdot 0,82}{74} = 9840 \text{ Н.}$$

С целью синхронизации операций для определения норм времени использовано построение циклограмм, из которых видны длительность и последовательность выполнения сборочных переходов. Циклограммирование является средством синхронизации всех совместно работающих сборочных и транспортных устройств, образующих сборочный модуль. При построении циклограммы определяются переходы, выполняемые на позиции последовательно, параллельно (одновременно) или такие, порядок выполнения которых безразличен. Построение циклограммы дало возможность с достаточной степенью детализации описать программы работы всех функциональных механизмов, проверить целесообразность подбора и объединения отдельных сборочных переходов. При построении циклограммы используются линейные координаты. Каждая строка соответствует одному из механизмов. В ней указаны название механизмов и тех функций (движений), которые они выполняют, даются такты работы механизмов, означающие те узловые моменты времени, в которые происходит смена состояния модуля. Показаны причинно-следственные связи, которые необходимо обеспечить в процессе функционирования оборудования для соблюдения последовательности срабатывания отдельных механизмов. Для определения временных параметров процесса функционирования использована следующая информация:

- перечень и функциональное назначение механизмов, входящих в состав модуля;
- значение параметров, описывающих структуру модуля;
- совокупность пространственно-временных отношений между всеми функциональными механизмами (i -й переход предшествует j -му и i -й переход следует за j -м, i -й переход выполняется одновременно (параллельно) с j -м).

Наиболее рациональная компоновка модуля сборки вала коробки передач состоит из порталного робота, накопителя сменных схватов, пресса, четырех магазинов с поворотными столами для устанавливаемых деталей, двух фиксирующих устройств, стопорного устройства, механизма кодирования, устройства смазки.

Сборочная головка предназначена для захвата, удержания и ориентирования положения и установки вала, шестерен, подшипника и шайбы. Она состоит из плиты, механизма поворота с пневмоцилиндром, двух пневматических схватов для захвата вала и шестерен. На механизме поворота закреплены три оправки. Две оправки предназначены для захвата подшипников, третья – для захвата шайбы. Механизм поворота имеет три фиксированных положения, в которых оправка направлена вертикально вниз.

Во время работы модуля необходимо, чтобы привод горизонтального перемещения головки включался только при фиксации ползуна вертикального перемещения в верхнем

положении. Схват головки начинает работать только при опускании ползуна в нижнее положение. Вращение сборочной головки вокруг вертикальной оси происходит одновременно с горизонтальным перемещением схвата, но исключено при включении привода вертикального перемещения головки.

Опускание пуансона пресса происходит лишь при завершении перемещения переталкивателя в конечное положение и фиксации транспорта, но одновременно с поворотом головки от вала к спутнику.

На основе циклограммы задаются программы сборочным модулям, которые вводятся в системы автоматического управления – в программируемые контроллеры или в память микроЭВМ., для чего был разработан алгоритм согласования работы отдельных механизмов для предотвращения их столкновения, обеспечивающий заданное относительное положение каждого механизма в определенный момент времени, определяющий норму времени каждого технологического перехода.

Широкое применение робототехнологических сборочных комплексов — не только технико-экономическая, но и важная социальная проблема, так как при их внедрении высвобождается много рабочих рук, коренным образом изменяется характер труда на производстве.

Литература

1. *Бухтеева И.В., Елхов П.Е.* Групповая гибкая технология сборки задних мостов грузовых автомобилей. // Известия МГТУ «МАМИ». - 2012. №14 - С. 7 -12.
2. *Аббясов В.М., Бухтеева И.В., Елхов П.Е.* Предварительный выбор и оптимизация надежности автоматического сборочного оборудования. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. - №5. С. 28 – 33.

Секция IV

Метрология и взаимозаменяемость

Председатель:

Пронякин Владимир Ильич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Метрология и взаимозаменяемость» (МТ-4)

Ученый секретарь:

Комшин Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-4

УДК 536.491**ВИБРОДИАГНОСТИКА НАСОСНОГО АГРЕГАТА XL 32-20-200 В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Юлия Олеговна Грабатьюк

*Студент 4 курса**кафедра «Метрология и взаимозаменяемость»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: О.В. Урманова**ассистент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость»*

Качество любой продукции закладывается при ее проектировании и затем обеспечивается при ее изготовлении. Отклонения от установленного технологического процесса изготовления и сборки ведут к ухудшению качества. С течением времени в процессе эксплуатации в объектах начинают происходить изменения, меняющие их потребительские свойства. Объекты становятся менее надежны. Поэтому возникает серьезная необходимость непрерывного контроля протекающих в объектах внутренних процессов, характеризующих прочностные свойства и степень надежности к любому моменту времени. А так как деталь или машина – не лист чертежной бумаги, а объемное тело (к тому же непрозрачное), то разработка способов получения наиболее полной информации о внутренних свойствах, качестве и происходящих в деталях процессах стала одной из актуальнейших задач сегодняшнего дня.

Именно вибродиагностика позволяет определить остаточный ресурс или прогнозируемый интервал безаварийной работы.

В работе используются измерения вибрации вала насоса. Установлено, что именно измерение вибрации валов позволяет получить информацию о состоянии машины или механизма и используются для разных целей, начиная с обычного контроля за состоянием машин при эксплуатации и в процессе испытаний при приемке продукции и заканчивая диагностированием машин и проведением исследовательских экспериментов.

Описание объекта исследования, его назначение, область применения, условия эксплуатации

Насосы серии XL типа ОН2 – горизонтальные, одноступенчатые, консольные насосы, имеющие один корпус подшипника для амортизации всех сил, действующих на вал насоса и сохраняющие положение ротора в процессе работы. Насосы монтируются на опорных плитах и соединены с приводами упругими муфтами.

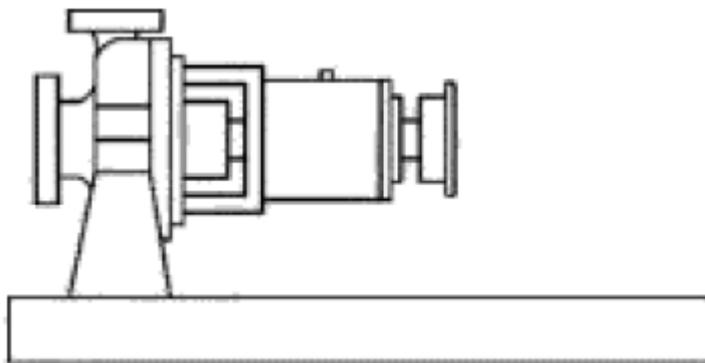
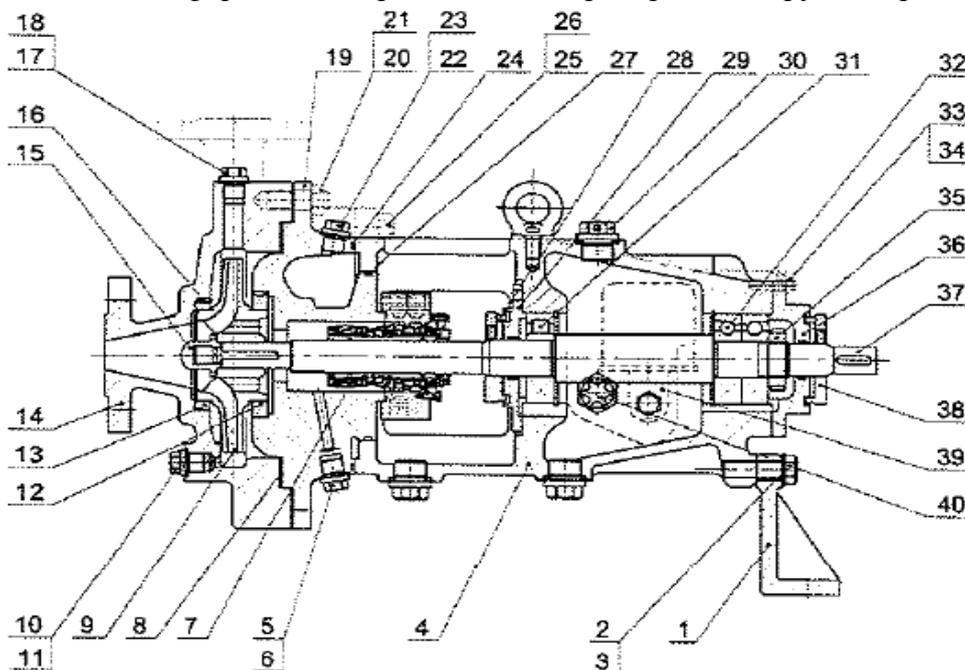


Рис. 1. Насос типа ОН2

Насосы серии XL служат для перекачивания различных видов жидкости с низкой или высокой температурой, нейтральных или агрессивных, чистых или загрязненных

механическими примесями и применяются для эксплуатации в технологических процессах с малыми расходами и высокими дифференциальными напорами.

Данная серия насосов предназначена главным образом для эксплуатации на предприятиях нефтяной, нефтехимической, химической, угольной промышленности, нефтедобывающих платформах, электростанциях и предприятиях других отраслей.



1 – опора корпуса подшипников; 2 – болт; 3 – шайба; 4 – корпус подшипникового узла; 5 – пробка; 6 – прокладка; 7 – торцовое уплотнение; 8 – прокладка; 9 – рабочее колесо; 10 – пробка; 11 – прокладка; 12 – щелевое кольцо крышки корпуса; 13 – щелевое кольцо корпуса; 14 – корпус; 15 – гайка рабочего колеса; 16 – винт; 17 – пробка; 18 – прокладка; 19 – крышка корпуса; 20 – гайка; 21 – шпилька; 22 – пробка; 23 – прокладка; 24 – уплотнительное кольцо; 25 – шпилька; 26 – гайка; 27 – уплотнительное кольцо; 28 – пыльник; 29 – передняя крышка корпуса подшипникового узла; 30 – вентиляционная пробка; 31 – радиальный роликовый подшипник; 32 – радиально-упорный шариковый подшипник; 33 – болт; 34 – гайка; 35 – гайка; 36 – задняя крышка корпуса подшипникового узла; 37 – вал; 38 – пыльник; 39 – масленка постоянного уровня; 40 – смотровое окно уровня масла.

Рис. 2. Продольный разрез насосного агрегата серии XL

Таблица 1. Рабочие параметры насоса

Номинальный диаметр рабочего колеса	200
Диаметр всасывающего патрубка, мм	32
Диаметр напорного патрубка, мм	20
Подача, м ³ /ч	2,5
Напор, м	50
Давление, МПа	до 2,5 МПа
Температура, °С	90
Частота вращения, об/мин	2950
Мощность, кВт	7,5

Причины возникновения вибрации

Как правило, на производстве возникают ошибки трёх видов, приводящие к авариям:

1. Технические ошибки. Они могут быть обусловлены:

- неправильным проектированием (неверно определены исходные нагрузки, ошибки в расчетах, неправильный выбор материалов и т.д.);
- неправильным изготовлением (заменяли материалы, не выдержали размеры, нарушили заданные режимы обработки, использовали в сборке бракованную деталь и т.п.), - т.е. элементы изделия или конструкции не соответствуют верному проекту;
- неправильной эксплуатацией (например, эксплуатация при нагрузках больше допустимых: через мост, рассчитанный на максимальный грузопоток 50 тонн, из – за закрытия соседнего моста пустили грузопоток 65 тонн).

2. Организационные ошибки. Вызваны тем, что руководитель проекта не предусмотрел организационные меры, предотвращающие перечисленные технические ошибки.

3. Недостаток квалификации, в результате чего руководитель или ответственное лицо не были достаточно хорошо обучены для того, чтобы избежать технических и организационных ошибок.

Источники вибрации и шума при эксплуатации:

- 1) Явление кавитации;
- 2) Нарушение центровки валов насоса и электродвигателя;
- 3) Износ подшипников, прогиб вала, повреждение вращающихся деталей;
- 4) Недостаточная прочность фундамента;
- 5) Недостаточная затяжка фундаментных болтов или ослабление крепления основных трубопроводов;
- 6) Плохая балансировка;
- 7) Подача насоса ниже максимально допустимой, т.е. ниже 10% от оптимальной подачи.

Определение измеряемых параметров

Большинство стандартов и нормативных документов по вибрации в качестве нормируемого параметра вибрации для контроля за техническим состоянием машины или механизма устанавливают *СКЗ виброскорости* в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц. Однако следует сказать, что применение только одного параметра виброскорости сужает частотный диапазон для предварительной оценки состояния оборудования.

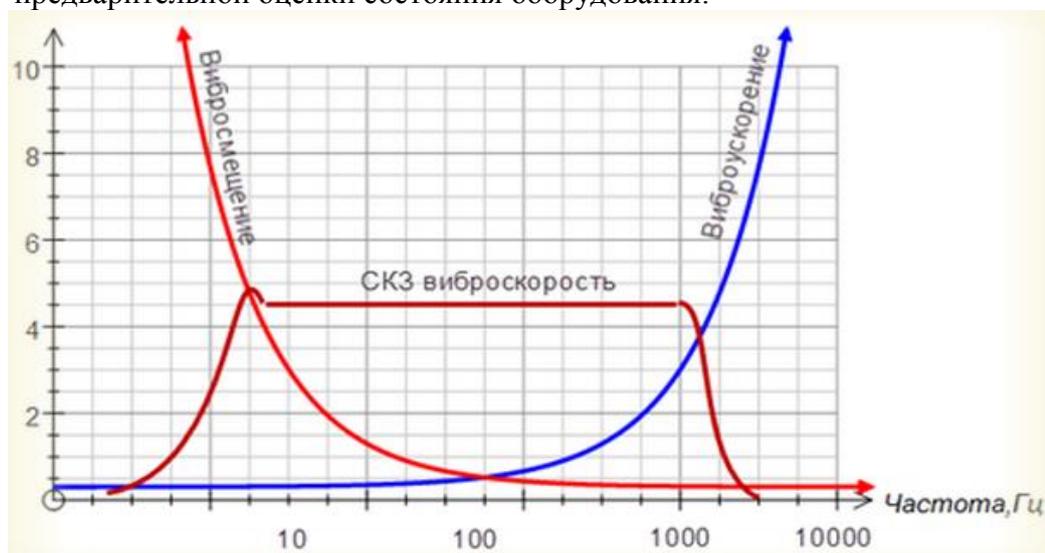


Рис. 3. Частотные характеристики виброскорости, виброперемещения и виброускорения

По кривой виброперемещения видно, что с ростом частоты снижается амплитуда. Это говорит о том, что на низких частотах возбуждаются высокие уровни виброперемещения, а на высоких частотах возбуждаются низкие уровни виброперемещения. Поэтому контролировать

вибрацию по параметру виброперемещение наиболее эффективно в низкочастотном диапазоне от 0 до 300 — 500 Гц.

Частотная характеристика виброскорости имеет относительно плоский участок от 10 до 1000—2000 Гц. Поэтому в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц рекомендуется контролировать вибрацию по параметру виброскорости.

Кривая виброускорения выгнута наружу и стремится вверх, это означает, что с ростом частоты возбуждаются высокие уровни виброускорения. Поэтому контролировать вибрацию по параметру виброускорение наиболее эффективно в высокочастотном диапазоне частот свыше 1000—2000 Гц. Использование виброускорения на частотах 100 Гц и ниже не эффективно.

На основании выше сказанного, следует, что для оценки технического состояния машин и механизмов обязательно нужно использовать виброскорость в *частотном диапазоне* от 10 до 2000 Гц. Если частота источника вибрации (например, масляная вибрация подшипника качения) находится в низкочастотном диапазоне от 0,5 до 500 Гц, то дополнительно к параметру виброскорости необходимо контролировать вибрацию по виброперемещению.

Известно, что вибрацию можно представить в виде простейших периодических колебаний, которые в свою очередь есть ни что иное, как гармонические колебания. График этих колебаний в зависимости от времени представляет собой синусоиду (рисунок 4). Время между двумя последующими, в точности схожими положениями колеблющейся точки (или тела) называют периодом колебания (T).

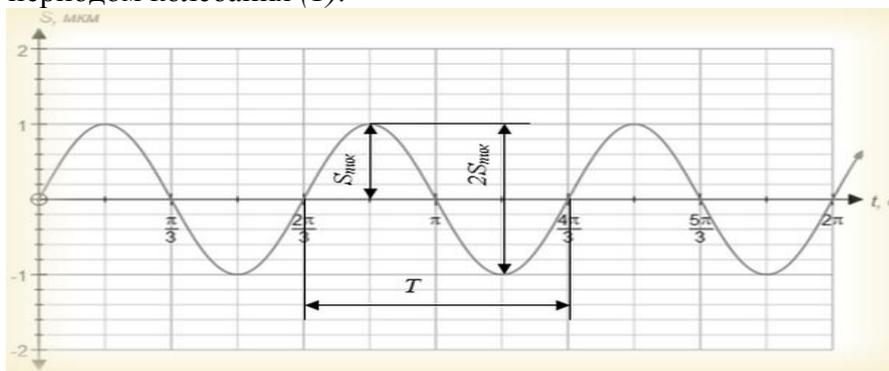


Рис. 4. График гармонических колебаний

Частота колебания связана с периодом через соотношение:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Что же касается величины колебания, то она может быть описана, согласно ГОСТ 10816-1-97, тремя основными параметрами:

виброперемещением (s), *виброскоростью* (v) и *виброускорением* (a). Эти параметры имеют определенные математические соотношения друг к другу при рассмотрении гармонических (простейших) колебаний. Если вибрация точки (или тела) имеет чисто продольную форму колебаний вдоль одной оси (x), то мгновенное *смещение* (*виброперемещение*) от исходного положения может быть описано математическим уравнением:

$$s(t) = S_{\text{пик}} \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где $S_{\text{пик}}$ — амплитуда перемещений;

$\omega = 2\pi f$ — угловая частота;

t — время.

Изменение смещения во времени является *скоростью* (*виброскорость*) движения точки (или тела). Поэтому колебания так же можно описать через скорость (v):

$$v(t) = \frac{ds(t)}{dt} = \omega S_{\text{пик}} \cos(\omega t + \varphi) = V_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

где $V_0 = \omega S_{\text{пик}}$.

Таким образом, виброперемещение может быть преобразовано в скорость посредством дифференцирования.

Дифференцирование сопровождается умножением амплитуды на частоту, поэтому амплитуда виброскорости на определенной частоте пропорциональна перемещению (s) умноженному на частоту (f). При фиксированном смещении скорость с увеличением частоты возрастет в два раза, а если частоту увеличить в 10 раз, то скорость возрастет в 10 раз.

На графике гармонических колебаний (рисунок 5) видно, что амплитуда скорости больше амплитуды перемещения.

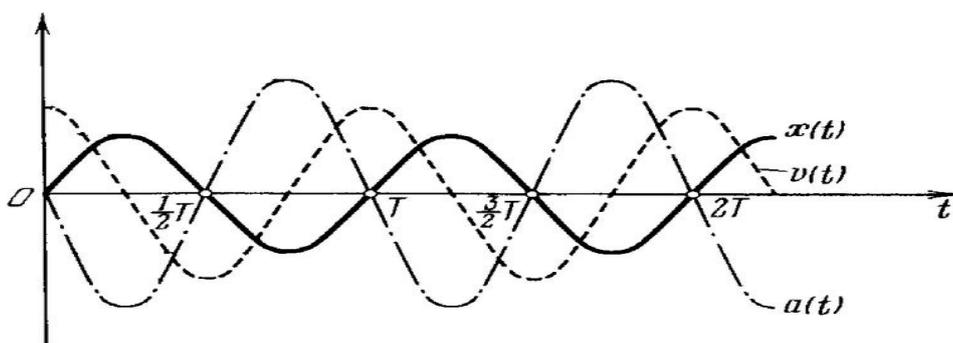


Рис. 5. Гармонические колебания перемещения, скорости и ускорения

В реальных условиях такими графиками, как правило, не получаются. Т.к. параметры вибрации измеряются в процессе эксплуатации центробежного насоса, то возникают шумы, которые влияют на измерительную информацию, снимаемую в результате измерений.

Примерами таких шумов являются всплески напряжения на линиях питания, молнии, изменения окружающей температуры, солнечная активность и т.д. Такие помехи при попадании в датчики и интерфейсные схемы сказываются на их выходных сигналах. При этом они влияют либо на чувствительные элементы датчиков, либо на их выводы, либо на электронные компоненты в схеме. Очевидно, что для интерференционных сигналов датчик и интерфейсная схема играют роль принимающих устройств.



Рис. 6. Источники вносимых шумов и способы их распространения

Если измерять только виброперемещение, шумы будут оказывать большое влияние, но если совместно с датчиками виброперемещения поставить датчики виброскорости, суммарные «полезные сигналы», снимаемые с датчиков будут значительно превышать помехи.

С.К.О. погрешности определения виброперемещения:

$$\sigma_{s_o} = \sigma[\Delta_s] + \sigma[\Delta_{sk}] - 2r_k \sqrt{\sigma[\Delta_s] \sigma[\Delta_{sk}]} \quad (4)$$

С.К.О. погрешности определения виброскорости:

$$\sigma_{v_o} = \sigma[\Delta_V] + \sigma[\Delta_{V_k}] - 2r_k \sqrt{\sigma[\Delta_V]\sigma[\Delta_{V_k}]} \quad (5)$$

«Полезные сигналы» $\sigma[\Delta_S]$ и $\sigma[\Delta_V]$ коррелируют между собой, а помехи $\sigma[\Delta_{S_k}]$ и $\sigma[\Delta_{V_k}]$ не коррелируют, т.е. мы условно можем задать:

$\sigma[\Delta_S] = \sigma[\Delta_V] = R_{SV}$, тогда получим результирующее С.К.О.

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{S_o} + \sigma_{v_o} = R_{SV}^2 + \sigma[\Delta_{S_k}] - 2r_k \sqrt{R_{SV}\sigma[\Delta_{S_k}]} + \sigma[\Delta_{V_k}] - 2r_k \sqrt{R_{SV}\sigma[\Delta_{V_k}]} \quad (6)$$

По ГОСТ ИСО 10817-1-2002: «Для определения общей траектории движения вала и его среднего положения во времени рекомендуется применять два датчика, расположенных под углом 90° друг к другу в одной плоскости измерений»

Для того, чтобы получить достоверную и наиболее полную информацию о состоянии вала в процессе его вращения необходимо установить по 2 датчика виброперемещения и виброскорости.

Тогда формула для С.К.О. примет вид:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{S_o} + \sigma_{v_o} = 4R_{SV}^2 + \Delta k, \quad (7)$$

где $\Delta k = 2(\sigma[\Delta_{S_k}] - 2r_k \sqrt{R_{SV}\sigma[\Delta_{S_k}]}) + 2(\sigma[\Delta_{V_k}] - 2r_k \sqrt{R_{SV}\sigma[\Delta_{V_k}]})$ - некоррелированные сигналы.

Первое слагаемое R_{SV}^2 наглядно показывает эффективность применения совместно датчиков виброскорости и виброускорения.

Согласно ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы», для контроля виброперемещения центробежного насоса применяются вихретоковый, индуктивный или оптический датчик.

Рассмотрим каждый из них подробнее.

Индуктивные датчики

Индуктивные датчики служат для бесконтактного получения информации о перемещениях рабочих органов машин, механизмов, роботов и т.п. и преобразования этой информации в электрический сигнал.

Индуктивный датчик распознает и соответственно реагирует на все токопроводящие предметы. Индуктивный датчик является бесконтактным, не требует механического воздействия, работает бесконтактно за счет изменения электромагнитного поля.

Преимущества:

- нет механического износа, отсутствуют отказы, связанные с состоянием контактов;
- отсутствует дребезг контактов и ложные срабатывания;
- высокая частота переключений до 3000 Hz;
- устойчив к механическим воздействиям.

Недостатки:

- сравнительно малая чувствительность;
- зависимость индуктивного сопротивления от частоты питающего напряжения;
- значительное обратное воздействие датчика на измеряемую величину (за счет притяжения якоря к сердечнику).

Вихретоковые датчики

Вихретоковые датчики предназначены для бесконтактного измерения вибрации перемещения и частоты вращения электропроводящих объектов.

Они применяются для диагностики состояния промышленных турбин, компрессоров, электромоторов. Наиболее часто объектом контроля является осевое смещение и радиальная вибрация вала ротора относительно корпуса.

Преимущества:

- практически безынерционен в звуковом диапазоне частот;
- пределы измерения амплитуд виброперемещения простираются от мкм до мм в зависимости от диаметра катушки;
- частотный диапазон – от нуля до сотен кГц;
- прост и надежен по конструкции;
- не чувствителен к поперечным вибрациям.

Недостатки:

- сравнительно большая погрешность измерений из-за влияния жестких условий эксплуатации большинства реальных объектов (высокая температура, давление, влажность и т. д.)

Оптические датчики

Оптические датчики имеют широкую сферу применения, в том числе служат для точного бесконтактного определения положения объекта в пространстве, скорости его движения.

Оптический бесконтактный датчик регистрирует изменение светового потока в контролируемой области, связанное с изменением положения в пространстве каких-либо движущихся частей механизмов и машин, отсутствия или присутствия объектов. Благодаря большим расстояниям срабатывания оптические бесконтактные датчики нашли широкое применение в промышленности и не только.

Преимущества:

- высокая точность, чувствительность и быстродействие;
- большая дальность действия;
- отсутствие механического контакта с измеряемым объектом;
- нечувствительность к материалу измеряемого объекта и его отражательной способности;
- нечувствительность к электромагнитным помехам;
- способность работать при высоких температурах.

Недостатки:

- трудности при установке, из-за наличия двух компонентов (приёмник и излучатель);
- чувствительность к степени загрязнения внешней среды (степень загрязнения не имеет значения только для инфракрасных датчиков).

Таким образом, был проведен анализ датчиков и выбраны датчики:

- для измерения виброперемещения: вихретоковый датчик AP2400A–V производства ООО «ГлобалТест»;
- для измерения виброскорости: индуктивный датчик MM-0002 компании Brüel & Kjaer.

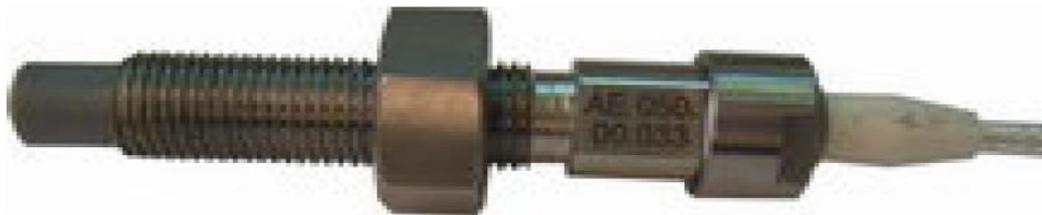


Рис. 7. Вихретоковый датчик AP2400–V



Рис. 8. Магнитный датчик MM – 0002

Патентный анализ

В ходе выполнения работы был также произведен патентный анализ в таких базах, как www.fips.ru, www.eapo.org и www.rupto.ru. Были найдены следующие документы.

Найдено достаточно много патентных документов, что говорит о том, что вибродиагностика в настоящее время является перспективными и развивающимся направлением.

Выводы

В работе был разработан новый способ вибродиагностики насосного агрегата с использованием четырех датчиков (2-х вихретоковых датчиков для измерения виброперемещения и 2-х индуктивных датчиков для измерения виброскорости). Для этого были определены измеряемые параметры вибрации, которые полностью удовлетворяли бы рабочим характеристикам насоса. Проведен сравнительный анализ датчиков для вибродиагностики, выбраны подходящие для данных условий эксплуатации. Проведен расчет измерительного канала. Также был произведен анализ патентов на подобную тематику («Вибродиагностика насоса») в российских и зарубежных открытых патентных базах данных. Однако не было найдено ни одного патента, в котором совместно измерялись бы и виброперемещение, и виброскорость. Исходя из этого можно сделать заключение о том, что разработанный метод пока не имеет аналогов.

Литература

1. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 198 с.
2. Горшков А.М. Насосы. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1947. – 188 с.
3. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991 г – 302.
4. Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика. – М.: Машиностроение, 2003. – 656.
5. Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. и др. Том III – 7 «Измерение, контроль, испытания и диагностика» (Энциклопедия «Машиностроение» в сорока томах). – М.: Машиностроение, 1996. – 464.

6. ГОСТ ИСО 10816 – 1 – 97 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования»
7. ГОСТ ИСО 7919 – 1 – 2002 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования»
8. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы»
9. ГОСТ 25275 – 82 «Приборы для измерения вращающихся машин. Общие технические требования»
10. ГОСТ Р 53565 – 2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов»
11. ГОСТ 32601 – 2013 «Насосы центробежные для нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности. Общие технические требования»
12. «Регламент технического обслуживания и диагностического контроля насосных агрегатов» Транснефть, Москва, 2003 г.
13. www.fips.ru – Информационно – поисковая система Федерального Института Промышленной Собственности
14. www.eapo.org – Евразийская патентная организация
15. www.rupto.ru – Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент)

Секция V

Литейные технологии

Председатель:

Семенов Вячеслав Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-5

Ученый секретарь:

Савохина Ольга Михайловна

ассистент кафедры МТ-5

УДК 621

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВКИ КОРПУС НАСОСА И ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОЛЕС НАСОСА КМ 50-32-125

Максим Олегович Моногаров

Студент 6 курса

кафедра «Технологии машиностроения»

Ливенский филиал Госуниверситета – УНПК

Научный руководитель: Ю.А. Бакурова

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения»

В работе выполнен анализ действующей технологии изготовления отливки со сложной геометрией, разработана новая технология получения отливки с оптимизацией процесса и освещены основные преимущества использования различных систем компьютерного 3D моделирования литейных процессов, используемых в ОАО ГМС «Ливгидромаш». Проведена оценка эффективности специального программного обеспечения, используемого при конструкторской подготовке литейного производства обеспечивающее повышение качества отливок.

Для улучшения качества выпускаемых изделий и экономии всех видов ресурсов возникает острая необходимость во внедрении в деятельность предприятий новых технологий, в том числе и информационных, что является наиболее актуальным в современных условиях конкуренции.

На предприятиях используются различные пакеты прикладных программ для проектирования литейной оснастки изделий из стали, чугуна, пластмассы и т.д. Для создания сложно-профильных литейных форм и поверхностей используются автоматизированные системы конструкторской подготовки, например Solid Works, Power SHAPE и LVM Flow и др [1-3].

Целью работы является разработка оптимальной технологии изготовления отливки корпус насоса КМ 50-32-125 и центробежных колес для указанного насоса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1 – выполнить анализ действующей технологии изготовления;
- 2 – выявить основные причины получения брака при изготовлении отливок по действующей технологии;
- 3 – разработать технологию получения отливок и осуществить ее оптимизацию с использованием соответствующих пакетов прикладных программ;
- 4 – выполнить проверку адекватности полученной технологии в соответствии с требованиями, предъявляемыми к точности отливок.

Методы исследования: в работе используются методы имитационного моделирования с использованием соответствующих программных продуктов. Экспериментальные исследования проводились на базе ОАО ГМС «Ливгидромаш» с использованием современных средств компьютерного моделирования и 3D-печати.

Новизна работы заключается в том, что разработана, оптимизирована и апробирована новая технология получения отливок, позволяющая получать отливки сложно-профильной геометрической формы требуемой точности при полном отсутствии брака.

Деталь «Корпус насоса» (рис. 1), насоса КМ 50-32-125 является основной деталью сборочной единицы в готовом изделии, которая имеет как конструктивно сложную гидравлическую напорную часть, так и большое количество поверхностей для

позиционирования остальных деталей сборочной единицы и это является основополагающим фактором к предъявлению к ней особого внимания на начальной стадии проектирования.

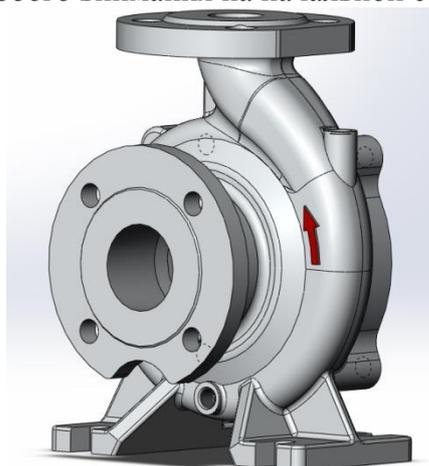


Рис. 1. Корпус насоса КМ 50-32-125

Во многих случаях решающим фактором является изначальная технология производства заготовок в литейном цехе. Данный вид деталей традиционно, в соответствии с заводской технологией, изготавливался на конвейере в песчано-глинистых формах.

В большинстве случаев (более 40%) данная деталь имела брак в виде скрытых дефектов (усадка, газовая сыпь), которые вскрывались на окончательной стадии механической обработки, а также дефектов в виде перекосов (отсутствие геометрической точности). Все эти факторы в сумме оказывали негативное влияние на производственный процесс уже изделия в целом. Дефекты в виде газовой сыпи, либо раковины на чистовых размерах не допускаются технологическими требованиями чертежа и кроме того портят товарный вид, так как имеют место и на необрабатываемой поверхности.

Для исключения дефектов по геометрической точности (перекосам) автором было принято решение применить процесс, при котором форма застывает с оснасткой, т.е. после заполнения полужелатинной формы составом и уплотнения формовочной смеси, и только после того, как состав затвердеет, идет извлечение модели заготовки. Это позволит исключить нарушение геометрической точности поверхности, а использование нового оборудования позволит выйти на новый технологический уровень производства [4].

Для данной номенклатуры деталей была разработана следующая технология:

- 1) изготовление стержней по Cold-box-amin процессу на стержневых автоматах Laempe, что позволило изготавливать и получать стержни высокой точности в большом количестве;
- 2) изготовление форм из химически твердеющих смесей (ХТС) на автоматической линии безопочной формовки FAT. Это позволило увеличить точность поверхности отливок. Кроме того, применение формовки на этой линии дало возможность увеличить количество отливок в форме до 8 штук (по формовке в ПГС было 2шт.)
- 3) покраска форм антипригарными красками, что позволило улучшить качество поверхности заготовки;
- 4) моделирование процесса заливки и выявления оптимальной технологии изготовления в системе LVM Flow.

Рассмотрим более подробно процесс проектирования отливки корпуса насоса КМ 50-32-125 в программе LVM Flow.

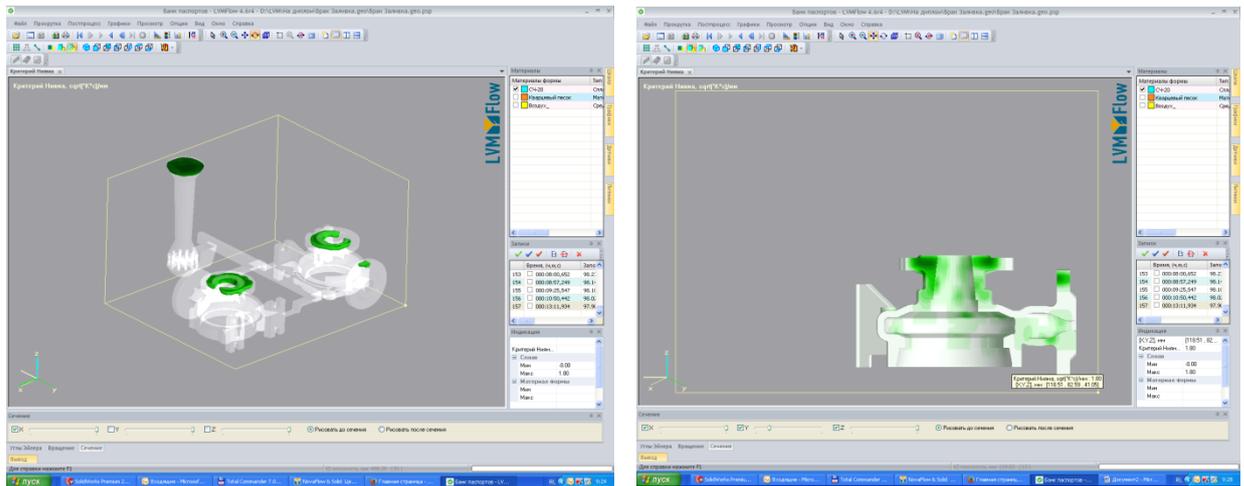


Рис. 2. Критерий Нияма

Воспользовавшись возможностями программного комплекса LVM Flow автором был смоделирован процесс получения отливки корпуса насоса с применением технологии, предложенной выше. В ходе моделирования полученные результаты, представленные на рисунках 2 и 3. Использование встроенных модулей «Критерий Нияма» (рис. 2) и «Усадка» (рис. 3) позволило обнаружить и визуализировать дефекты, наибольшая концентрация которых наблюдается во фланцах. При реализации технологии литья до использования программного комплекса LVM Flow подобные дефекты вскрывались только на стадии чистовой обработки. В результате отливки с указанными дефектами оказывались не пригодны к исправлению.

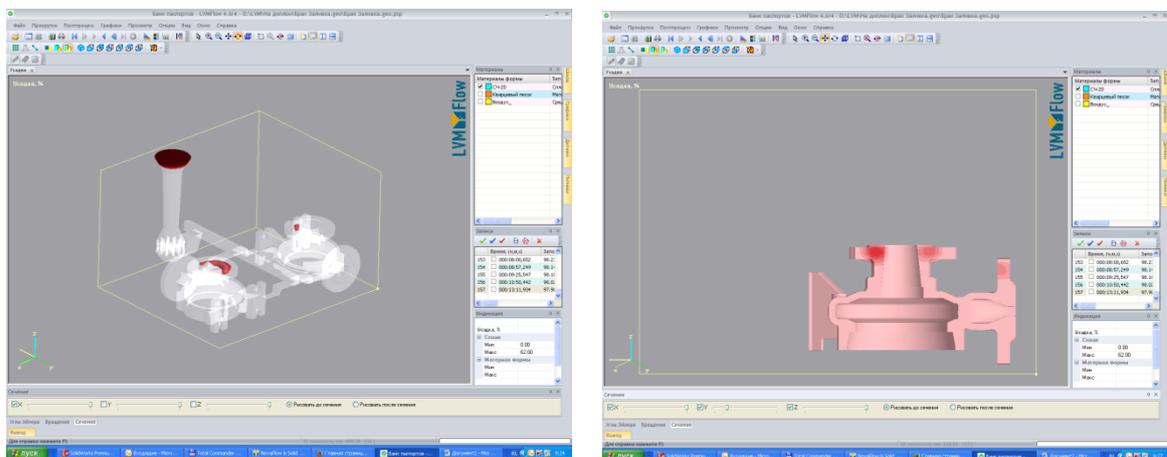


Рис. 3. Усадка

Доработка и модернизация технологии получения отливки корпуса насоса КМ 50-32-125 заключалась в добавлении выпаров для частичной подпитки и обширного выхода газов из заполняемой полости металлом (рис. 4):

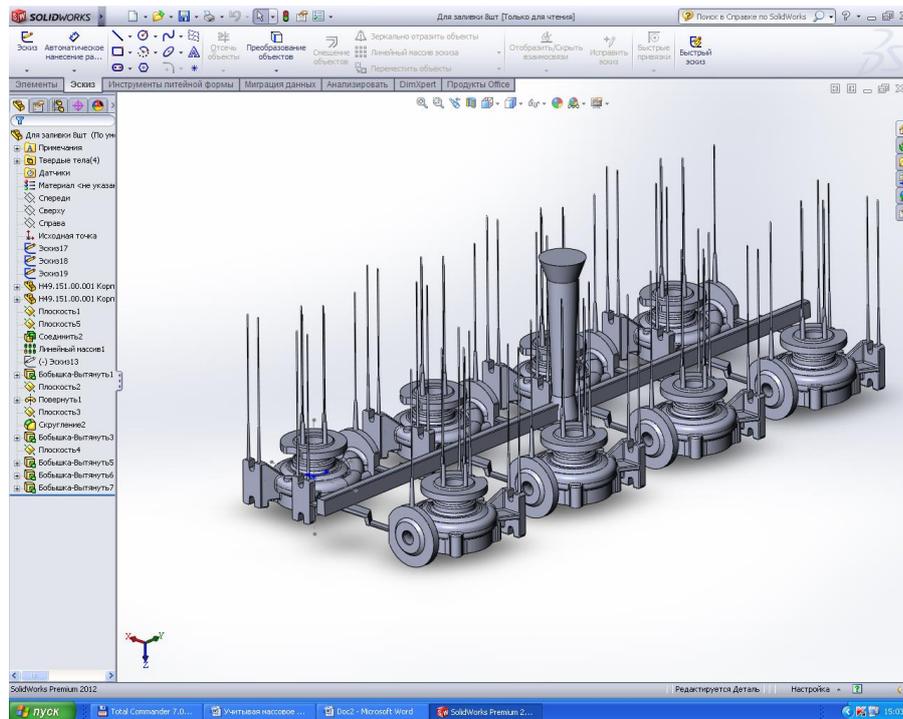


Рис. 4. Результат моделирования получения отливок корпуса насоса КМ 50-32-125 после модернизации и оптимизации.

После проведенной модернизации удалось исключить дефекты в получаемых отливках, в том числе и во фланцах (рис. 5).

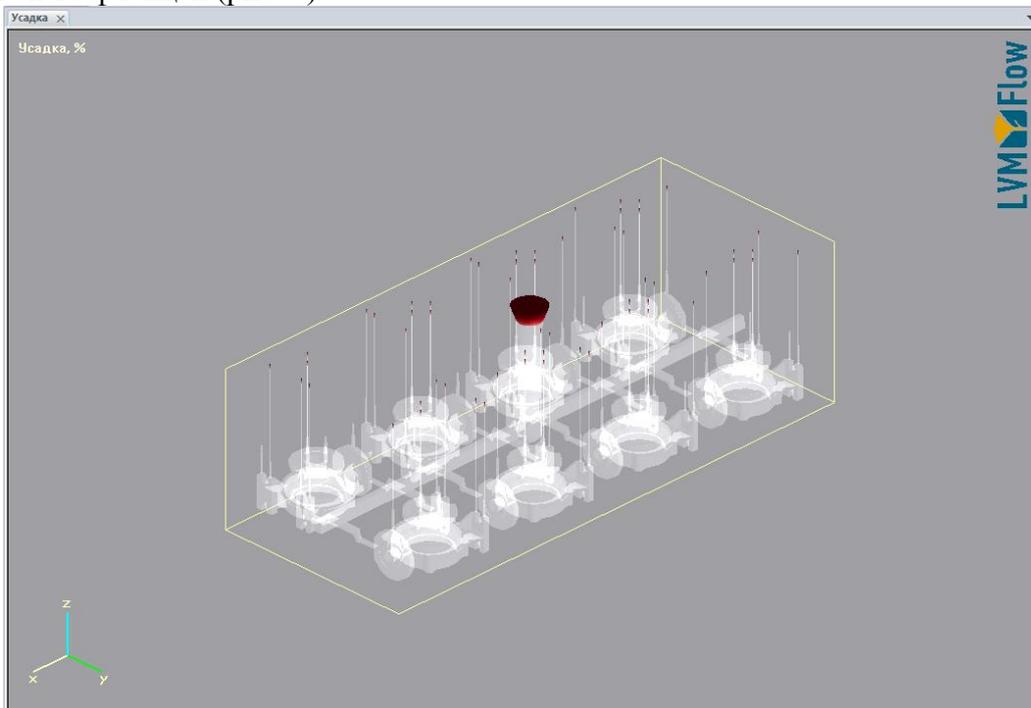


Рис. 5. Усадка

Для того, чтобы удостовериться в том, что дефекты отливки исключены полностью необходимо выполнить сечение отливки (рис.6). В результате видим, что дефекты исключены полностью

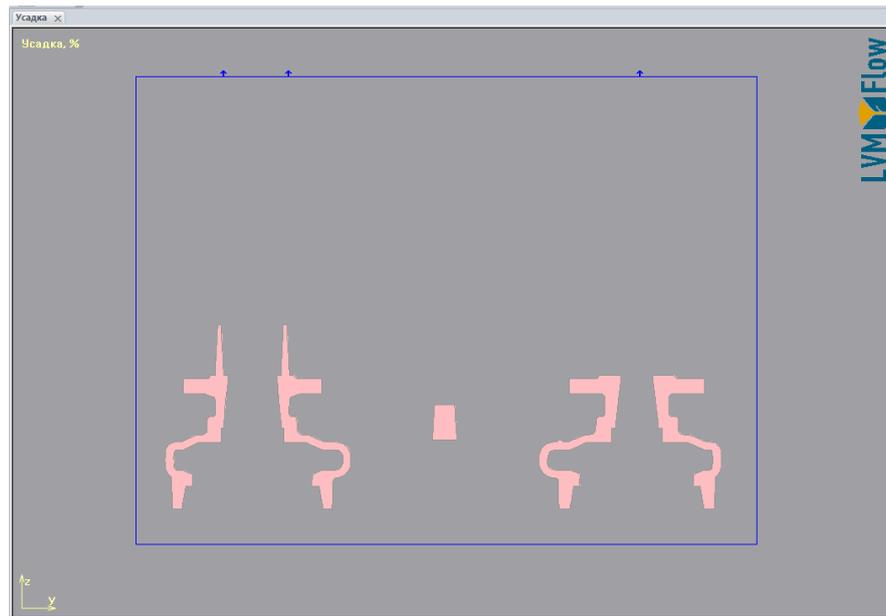


Рис. 6. Усадка (сечение отливки)

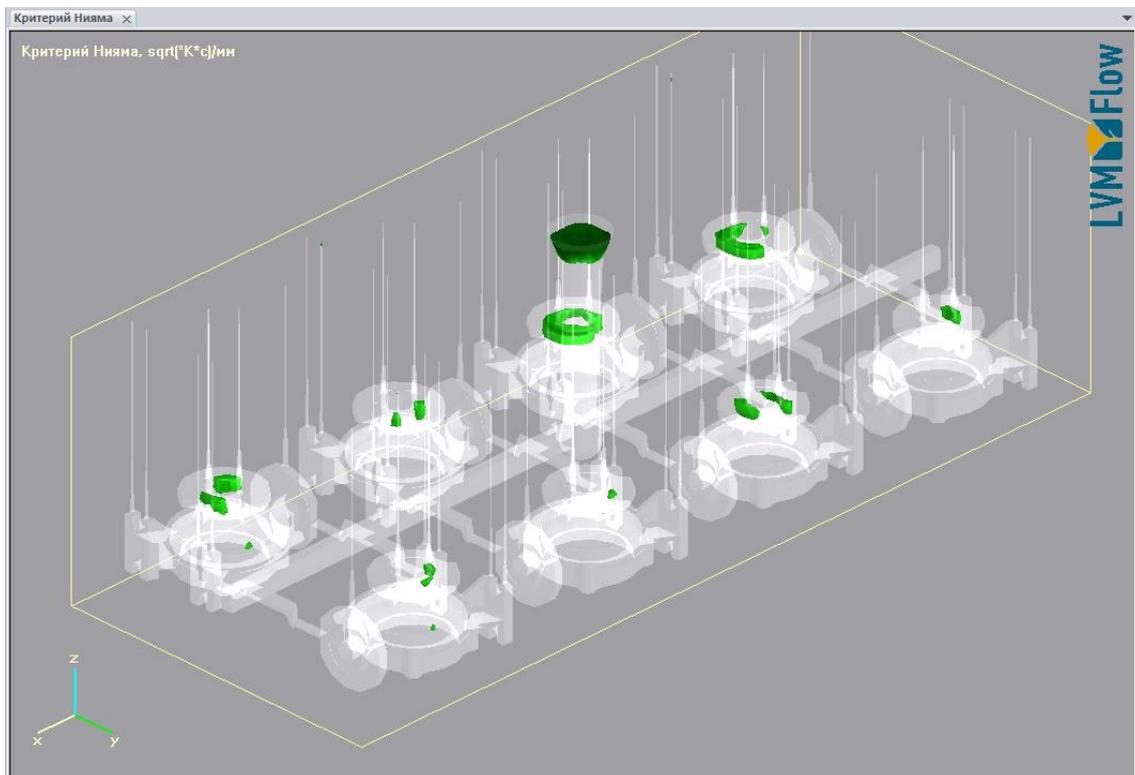


Рис. 7. Критерий Нияма

Таким образом, предложенная технология позволяет обеспечить получение отливок требуемой геометрической точности, и, как следствие, высокое качество изделий. Улучшение качества литья за счет применения формовки на линии FAT с последующей покраской поверхности и изготовление стержней на стержневых автоматах Laetpre позволило снизить припуски на механическую обработку и добиться снижения металлоемкости детали: вес отливки до модернизации технологии составлял 12,4 кг, после модернизации - 10,0 кг, при этом вес детали составляет 8,8 кг.

В указанных центробежных насосах в виде рабочих элементов используются центробежные колеса, которые также требуют особого внимания по требованиям к точности

т.к. имеют пространственные лопасти. Из – за сложности геометрической формы и наличия поднутрений традиционным вариантом технологии получения такого колеса является изготовление стержней проточной части вручную. Лопатки для модельной оснастки данных колес изготавливаются по шаблонам вручную из алюминиевой заготовки, что неизбежно ведёт к нарушению геометрической точности и влиянию человеческого фактора.

Для данной детали автором было предложено применить Gold-box-amin процесс. В ходе проведенных исследования было выявлено, что алюминий из-за своих физических свойств не позволяет получить готовый стержень без разрушений последнего из-за наличия поднутрений и выгнутой геометрии. В этой связи было предложено изготовление лопастей рабочего колеса для модельной оснастки из литевых смол в силиконовых формах по мастер-модели, напечатанной на 3D принтере (рис. 8).



Рис. 8. Элемент модельной оснастки, изготовленный на 3D принтере.

По технологии процесса, применение материала использованного на 3D принтере в Gold-box-amin процессе, не позволяет использовать напечатанную модель в производственном цикле из-за малой его пластичности. Поэтому было принято решение использовать напечатанный элемент как высокоточную мастер-модель (точность печати 16-39 мкм), по которой будет изготавливаться отпечаток из технического силикона (рис. 9).



Рис. 9. Изготовление отпечатка

Полученный отпечаток на мастер-модели имеет точную копию модели. В дальнейшем в полученный отпечаток заливаем материал для будущей оснастки. В данный момент для изготовления использовались эластичные полиуретановые литьевые смолы (рис. 10).



Рис. 10. Залитая мастер-модель.

Готовый элемент модельной оснастки повторяет точные контуры мастер-модели (рис. 11), и имеет хорошие физические свойства - очень высокая абразивность, низкая усадка, высокая ударостойкость и прочность на разрыв, что позволяет нам использовать её в производственном процессе.



Рис. 11. Готовый элемент (на фотографиях – объект слева).

Таким образом, в ходе проделанной работы удалось выявить основные причины получения брака отливок, разработать, оптимизировать и апробировать новую технологию изготовления отливок и литейных форм для их получения, обеспечивающих требуемую геометрическую точность, стабильность показателей качества и, как следствие, экономию материальных ресурсов, а также повышение темпов производства. Разработанная технология с использованием специального программного обеспечения позволяет обеспечить создание адекватных сложно-профильных поверхностей, соответствующих требованиям заказчика, выполнить оптимизацию созданной литейной оснастки; а также повысить качество литейного производства и, как следствие, качества изделий предприятия в целом.

Литература

1. <http://www.solidworks.ru>
2. <http://www.powershape.com>
3. <http://www.lvmflow.ru/index.php/examples>
4. Бакурова, Ю.А. Изготовление сложно-профильной литейной оснастки с использованием систем автоматизированного проектирования [Текст] / Ю.А. Бакурова, М.О. Моногаров.

Труды XVI научной конференции «Математическое моделирование и информатика». / под ред. Д.Ю. Рязанова. – М.: ИЦ ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2014. –С. 150-153.

УДК 669.131.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОЛУЧЕНИЕ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Нурлан Фейзуллаевич Нуралиев

Студент 3 курса

кафедра «Литейные технологии»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Ю. Коротченко

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Литейные технологии»

Цель работы: Исследование влияния технологических параметров на получение трубных заготовок из высокопрочного чугуна.

Исследование проводили на специальной установке (рисунок 1).

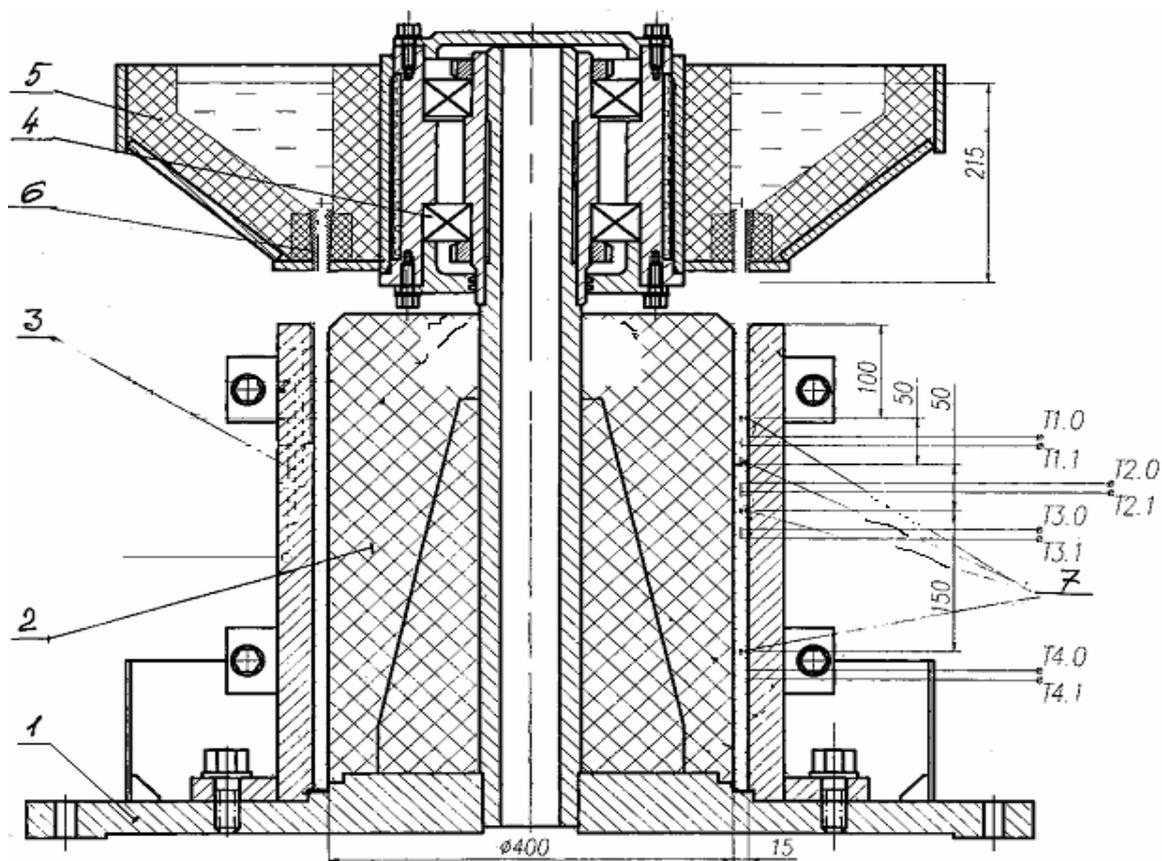


Рис. 1. Схема установки для исследования технологических параметров опытных трубных заготовок

Позиция 7 показывает расположение термодпар при замерах температуры отливок.

Установка включает опорную плиту, поз. 1 с вертикальной цилиндрической колонной, служащей каркасом для будущего литейного стержня, поз. 2 и центральной опорой для вращающейся литниковой чаши с подшипником. Подшипниковый узел, поз. 4 устанавливается на верхнем конце цилиндрической колонны до ограничительного выступа. На подшипниковый узел устанавливается футерованная литниковая чаша, поз. 5, которая может вращаться при заливке формы. В днище чаши предусмотрены 6 отверстий для установки литников, поз 6 для дождевой заливки опытных отливок трубных заготовок.

В качестве переменных параметров были выбраны диаметр и количество литников, и температура заливки, т.к. они определяют качество отливки (плотность металла, отсутствие дефектов).

При проведении экспериментов чугун плавил на одинаковой шихте. Температура заливки менялась от 1300 до 1450°C а суммарное сечение питателей от 3,01 до 5,40 см².

Результаты исследований приведены в опытной таблице 1.

Таблица 1. Параметры литья опытных трубных заготовок

№ трубы	Питатели			Температура чугуна, °С		Скорость заливки, кг/с	Продол- жительность заливки, с
	кол- во, шт.	диаметр, мм	суммарное сечение, см ²	выпуск из печи	заливка		
1	6	8	3,01	1475	1307	1,04	67
2	6	10	4,71	1470	1360	1,32	53
3	2	12	2,26	1480	1365	1,17	60
4	2	12	5,40	1480	1360	1,4	50
	4	10					
5	2	12	5,40	1550	1374	1,46	48
	4	10					
6	2	12	5,40	1500	1434	1,75	40
	4	10					
7	4	12	4,52	1475	1365	1,52	46
8	4	12	4,52	1470	1370	1,49	47
9	3	12	3,39	1490	1385	1,35	52
10	3	12	3,39	1480	1408	1,56	45
11	3	12	3,39	1470	1385	1,46	48
12	2	12	2,26	1465	1365	1,16	60
13	2	12	2,26	1520	1410	1,20	58

Скорость заливки (кг/с) высчитывалась при известной массе отливки (кг) и продолжительности заливки (с).

На рисунке 2. показаны все опытные трубные заготовки, отлитые при проведении настоящих исследований.



Рис. 2. Опытные заготовки трубы, отлитые для исследования параметров заливки

Запись кривых охлаждения проводили на четырехканальном приборе «Термодат-17М». Записанные в архив температурные данные переносились в компьютер для последующей обработки. Прибор регистрирует замеряемые характеристики в реальном времени с указанием по оси абсцисс год, месяц, день, час, мин., сек. По записанным таким образом, данным можно с большой точностью определить продолжительность заливки и кристаллизации опытных трубных отливок. Одновременно с записью кривых охлаждения.



Рис. 3. Схема установки термопар на заданную глубину в стенку отливки и запись температур

Изменение температуры в форме и в теле отливки проводили на четырех горизонтах отливки. Первый горизонт на расстоянии 100 мм от верха отливки. Второй и третий на расстоянии 50 и 100 мм соответственно от первого. Четвертый, самый нижний, на расстоянии 150 мм от третьего. Схема установки термопар приведена на рисунке 3.

Результаты эксперимента.

Температура эвтектической кристаллизации чугуна в трубной заготовке фиксировалась на уровне 850...900°C вместо 1120...1130С, т.е. с очень большим «переохлаждением» 280...230°C. Такое явление, по-видимому, вполне возможно, если учесть, что толщина стенки опытной заготовки трубы всего 15 мм и металл кристаллизуется очень быстро от стенки холодного массивного металлического кокиля.

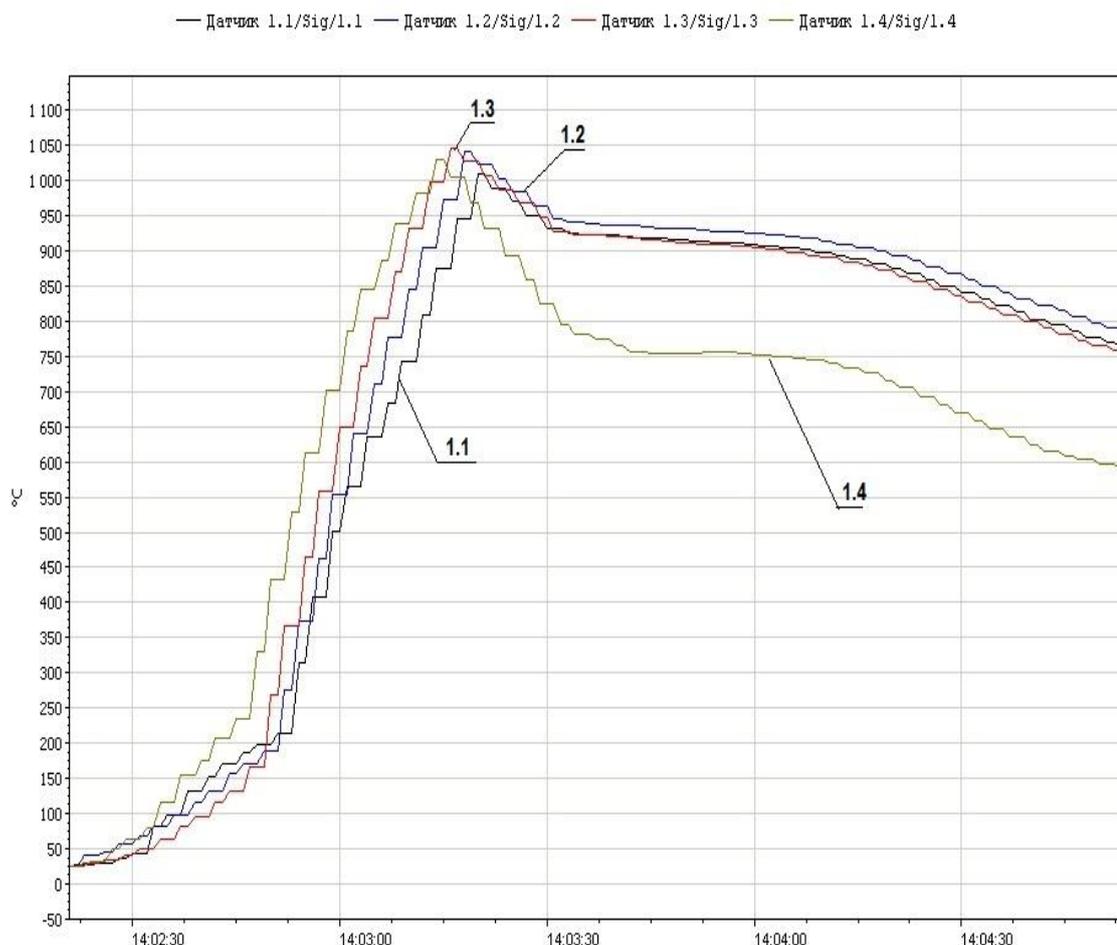


Рис. 4. Труба № 5 заливалась при температуре 1374°C через 2 литника диаметром 12 мм и четыре литника диаметром 10 мм

Термопара 1.1 верх отливки в 3 мм от стенки кокиля.

Термопара 1.2 верх отливки в 8 мм от стенки кокиля.

Термопара 1.3 второй горизонт от верха отливки в 3 мм от стенки кокиля.

Термопара 1.4 второй горизонт от верха отливки в 8 мм от стенки кокиля.

Анализируя полученные кривые охлаждения можно с большой точностью определить продолжительность всех этапов охлаждения отливки в разных точках по шкале реального времени, зафиксированном на шкале абсцисс. Из графика (опытной трубной заготовки №5) можно определить, что продолжительность заливки (окончание заливки в момент достижения максимальной температуры) составляет 48 сек. Максимальная температура достигла 1050°C через 48 сек с начала заливки, причем такую температуру показали все термопары. Согласно приведенным кривым охлаждения, начало эвтектической кристаллизации начинается примерно

через 14сек после достижения максимальной температуры, а полное затвердевание продолжается не более 40-60 сек, т.е. через 2 мин после начала заливки затвердевание отливки полностью завершается.

В качестве примера на рисунке 4 показаны полученные в эксперименте кривые охлаждения трубной заготовки №5.

Температура в теле отливки по высоте и толщине стенки отличается незначительно. Характерно, что температура эвтектической кристаллизации из-за большой скорости охлаждения снижается до 930°C, переохлаждение при кристаллизации достигает 200°C.

Переохлаждение при кристаллизации в нижней зоне трубной заготовки почти на 80°C больше, чем в верхних ее слоях. Это вполне объяснимо, т.к. первые порции чугуна подвергаются интенсивному теплоотводу массивным, холодным кокилем. Продолжительность заливки по данным графикам до уровня термпары, расположенной на втором уровне от верха отливки ~ 42 сек. Время заливки до верхней кромки, зафиксированное по секундомеру – 52 сек. Анализ полученных кривых так же позволяет утверждать, что затвердевание отливки заканчивается через 100-110 сек после начала заливки формы.

Анализируя все записанные кривые охлаждения при разных условиях заливки можно констатировать, что характер кривых охлаждения опытной трубной заготовки во всех случаях практически одинаков. Фиксируемая температура эвтектической кристаллизации значительно ниже теоретической, что свидетельствует об интенсивном теплоотводе в процессе заливки и охлаждении опытной трубной заготовки. Кроме того, если учесть, что при переливе металла из печи в ковш, разогретый до температуры 700... 900°C, падение температуры составляет 50...70°C, в нашем случае, при заливке опытных трубных заготовок, заливка осуществлялась через промежуточную холодную чашу, можно ожидать, что в форму чугун попадал при температуре ниже 1300°C.

Полученные данные свидетельствуют также о том, что затвердевание опытных отливок продолжалось не более 110 сек. независимо от температуры заливки.

Вывод:

1) В результате опыта установлено, что оптимальный режимы заливки обеспечиваются при температуре заливки 1365 С , со скоростью заливки 1,52 кг/с кол-во литников 4при их суммарном сечении 4,52 см². Поскольку при этом были достигнуты необходимое качество отливки.

2) Температура кристаллизации чугуна в трубной заготовке отмечена при температуре 850...900°C вместо 1120...1130С, т.е. переохлаждение составило 280...230°C что объясняется ускоренным теплообменом между кокилем и трубной заготовкой, которая имеет толщину стенки всего 15 мм.

Литература

1. *Беляков А.И., Жуков А.А., Маццарелли Д., Беляков А.А.* Производство отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. // – М.: Машиностроение, 2010. – 712 с.
2. *Шумихин В.С., Кутузов В.П., Храмченков А.И.* Высококачественные чугун для отливок. // – М.: Машиностроение, 1982. – 222 с.

УДК 669.131.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ НА ПОРИСТОСТЬ ОТЛИВОК ПРИ ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Зин Аунг Чжо

Магистрант 2 года

кафедра «Литейные технологии»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.М. Зарубин

кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные технологии»

Литниковая и вентиляционная система должны обеспечивать заполнение рабочей полости пресс-формы без образования «спаев» и «недоливов», получение отливок с требуемой шероховатостью поверхности и минимальной пористостью. Такие характеристики отливок обеспечиваются при наиболее полном удалении газов из пресс-формы в процессе заполнения ее рабочей полости расплавом.

Различают два основных вида литниковых систем: внутреннюю (подвод расплава осуществляется по внутреннему контуру отливки) и внешнюю (с подводом расплава по внешнему контуру отливки).

Внутреннюю литниковую систему чаще всего применяют в одногнездных пресс-формах для получения отливок, имеющих в центре открытую полость (кольца, рамы и втулки), или для отливок, не имеющих таких полостей. Литниковую систему, в этом случае, подводят непосредственно в тело отливки без использования питателя. Использование внутренней системы позволяет легко отделять от нее отливку, не увеличивая при этом габаритные размеры одногнездной пресс-формы.

Внешняя литниковая система более универсальна и применяется в одно-гнездных и многогнездных пресс-формах.

Для повышения качества отливок используют промывники.

Анализ литературных данных показал, что характер течения расплава в рабочей полости во многом определяется не только геометрией отливок, размерами и местом расположения питателей, но и тем как сформирован поток другими подводными элементами литниковой системы. Оптимизацию геометрии литниковой системы для отливки «Радиатор игольчатый» осуществляли с учетом результатов проведенного анализа литературных данных и путем использования программы Flow 3D.

Расчеты показали, что применение традиционной литниковой системы как с коротким (длиной 5 мм, Рис. 1 а), так и с увеличенным (20 мм, Рис. 1 б) питателем не приводит к последовательному заполнению основания радиатора. При таком характере заполнения формы газы, запертые в центральной части отливки, повышают вероятность ее поражения «недоливом» иглоком. Он резко снижает механические и эксплуатационные свойства отливок.

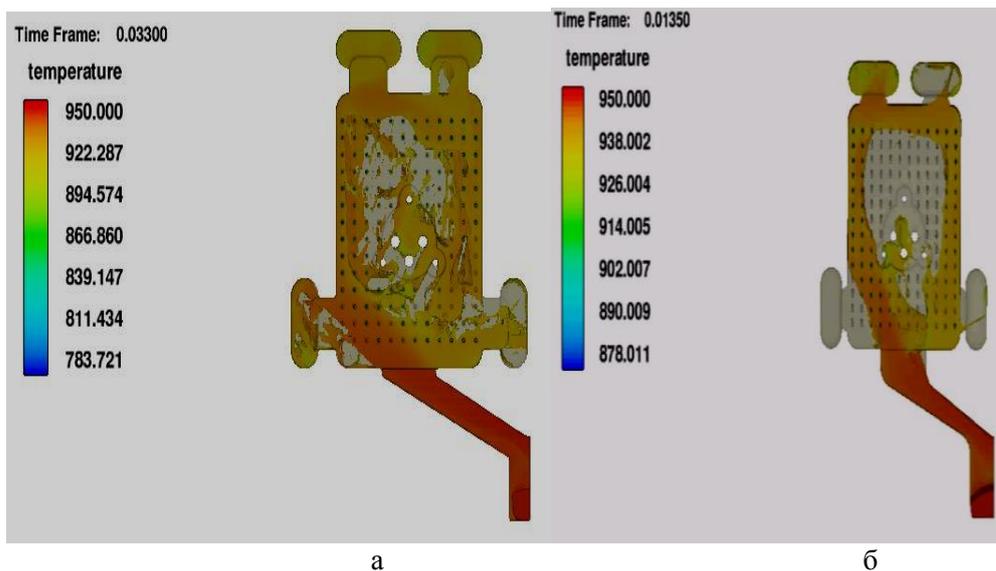


Рис. 1. Результаты моделирования заполнения игольчатого радиатора (а – длина питателя 5мм, б – длина питателя 20мм).

На Рис. 2 приведены варианты тангенциальной литниковой системы [2], позволяющие сформировать поток расплава с необходимыми скоростными характеристиками.

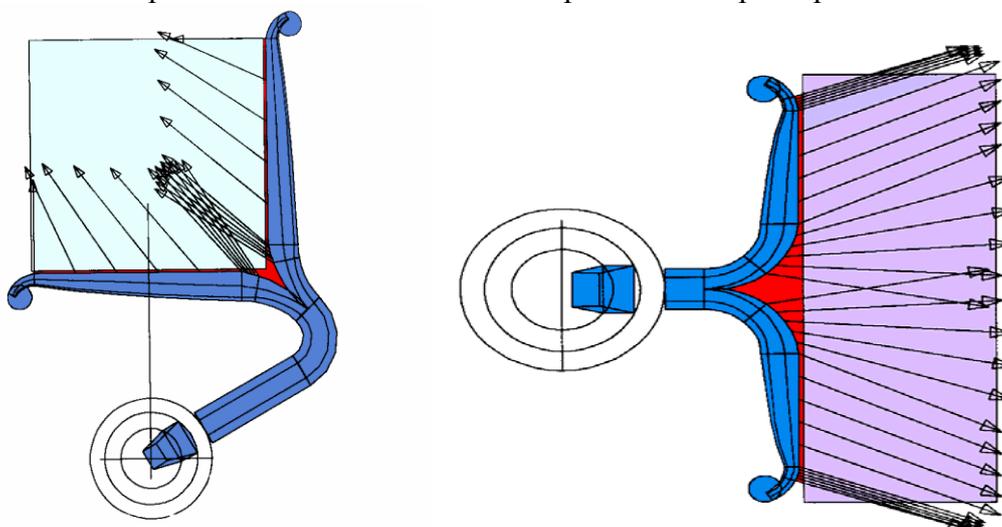


Рис. 2. Тангенциальная литниковая система (а – подвод расплава к двум сторонам отливки; б – подвод расплава выполнен к одной ее стороне).

При использовании конструкции литниковой системы близкой к тангенциальной (рис. 3), характер заполнения формы изменился и в большей степени стал соответствовать «идеальному», то есть масса газов в рабочих частях формы, оформляющих иголки радиатора, перед их заполнением расплавом, стала значительно меньше по сравнению с вариантами рассмотренными выше. Это позволит снизить пористость отливок и вероятность «недолива» этих иголок, отвечающих за эффективность работы радиатора.

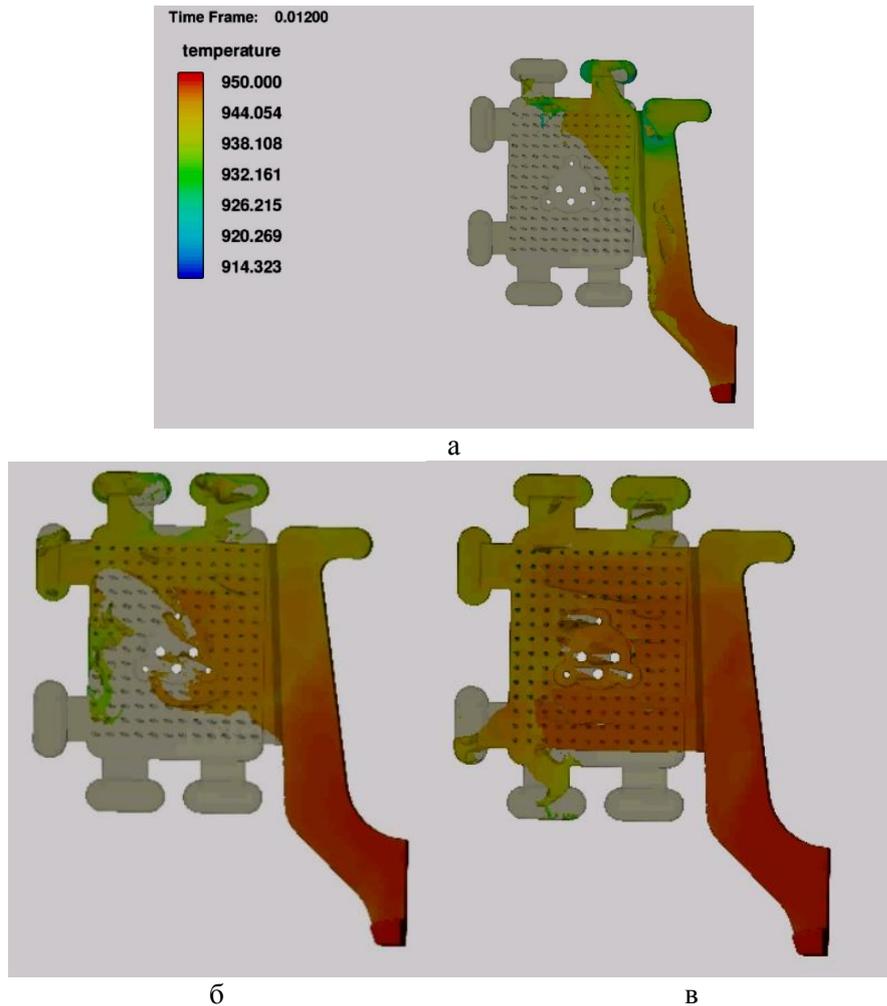


Рис. 3. Заполнение формы для отливки «Радиатор игольчатый» с использованием тангенциальной литниковой системы (а – через 0,012 с; б – 0,021 с; в – 0,03 с).

Выводы:

1. Основное влияние на газосодержание отливок из числа исследованных факторов оказывает скорость прессования. При ее увеличении уменьшается время заполнения, изменяется режим движения металла как в полости формы, так и в камере прессования, что способствует росту газосодержания отливок;

2. Для обеспечения направленного заполнения рабочей полости пресс – формы для отливки «Радиатор игольчатый» можно воспользоваться тангенциальной литниковой системой.

Литература

1. Литье под давлением / Под ред. А. К. Белопухова. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
2. Brunhuber E. Moderne Druckguss – Fertigung. Berlin, 1971. – 342 с.

Секция VI

Оборудование и технологии обработки давлением

Председатель:

Евсюков Сергей Александрович
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Технологии обработки металлов давлением»
(МТ-6)

Ученый секретарь:

Белокуров Олег Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-6

УДК 621.7.043

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИУСОВ МАТРИЦЫ И ПУАНСОНА НА ПРОЦЕСС ВЫТЯЖКИ

Дмитрий Николаевич Бадулин

*Студент 3 курса**кафедра «Технологии обработки давлением»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: В.А. Дёмин**доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки давлением»*

Исследуется влияние радиусов пуансонов и матриц на напряженно-деформированное состояние при вытяжке.

Ключевые слова: машиностроение; обработка металла давлением; листовая штамповка; вытяжка.

На практике применяется большое количество формул для расчета максимальных напряжений при вытяжке, однако при их использовании не учитывается физическая и геометрическая неоднородность заготовки. Поэтому, исследование влияния этих факторов на максимальные напряжения является актуальной задачей.

Приведена формула для нахождения σ_{max}

$$\sigma_{max} = \sigma_s \left(\frac{s}{2r_m + s} + \frac{s}{4r_p + 2s} + \ln \frac{1}{m} + \frac{\mu \cdot Q}{\sigma_s \cdot \pi \cdot R \cdot s} \right) (1 + 1,6\mu), \quad (1)$$

учет влияния трения проводят по упрощенной методике.

где σ_s – временное сопротивление;

S – толщина заготовки;

r_m – радиус матрицы;

r_p – радиус пуансона;

R – радиус заготовки;

r – радиус детали;

Q – сила прижима;

μ – коэффициент трения;

m – коэффициент вытяжки;

Для определенности принимаем сталь 08 ВГ, которая по ГОСТ 9045-93 имеет следующие параметры $\sigma_B = 320 \text{ Н/мм}^2$ (математическое ожидание для диапазона 250..390 Н/мм²; $S = 1 \pm 0.11 \text{ мм}$ по ГОСТ 19904-90; принимаем, что коэффициент трения изменяется в диапазоне $\mu = 0.1..0.15$; $r_m = 5 \text{ мм}$; $r_p = 5 \text{ мм}$. Радиусы пуансона и матрицы выбираются в соответствии с рекомендациями, данными в [1].

Рассмотрим влияние радиуса пуансона и радиуса матрицы на максимальное напряжение.

С помощью программы, написанной с помощью пакета MathCad, определим максимальное напряжение, которое будет возникать в опасном сечении при увеличении радиусов инструментов. Для определения влияния радиусов инструментов, мы последовательно, с заданным шагом (0,1 мм) увеличиваем один из параметров при неизменном другом, принимая его заданным выше.

Первым исследуем зависимость максимального напряжения в зависимости от радиуса пуансона.

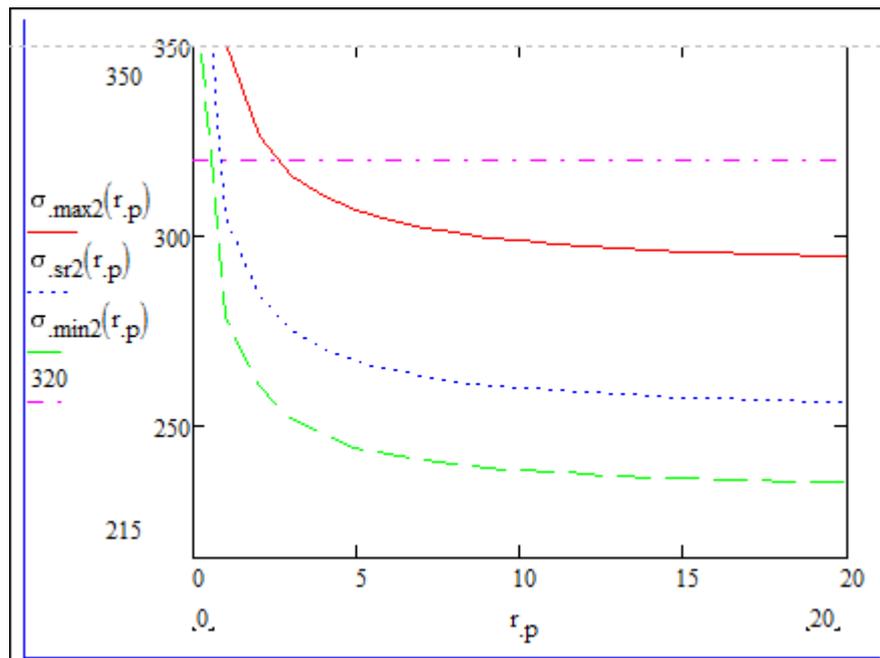


Рис. 1. Красным цветом показан график, соответствующий максимальному напряжению. Синей пунктирной линией показано математическое ожидание критического напряжения. Зеленой пунктирной линией показано значение минимального значения напряжения.

В результате аналитически получены следующие результаты:

Для высококачественного материала и смазки минимальный критический радиус пуансона, $r_p=0,87$ мм, при котором происходит разрушение материала и нарушение технологического процесса.

Для низкокачественного материала и смазки минимальный критический радиус пуансона $r_p=2,2$ мм

Далее рассмотрим влияние радиуса матрицы.

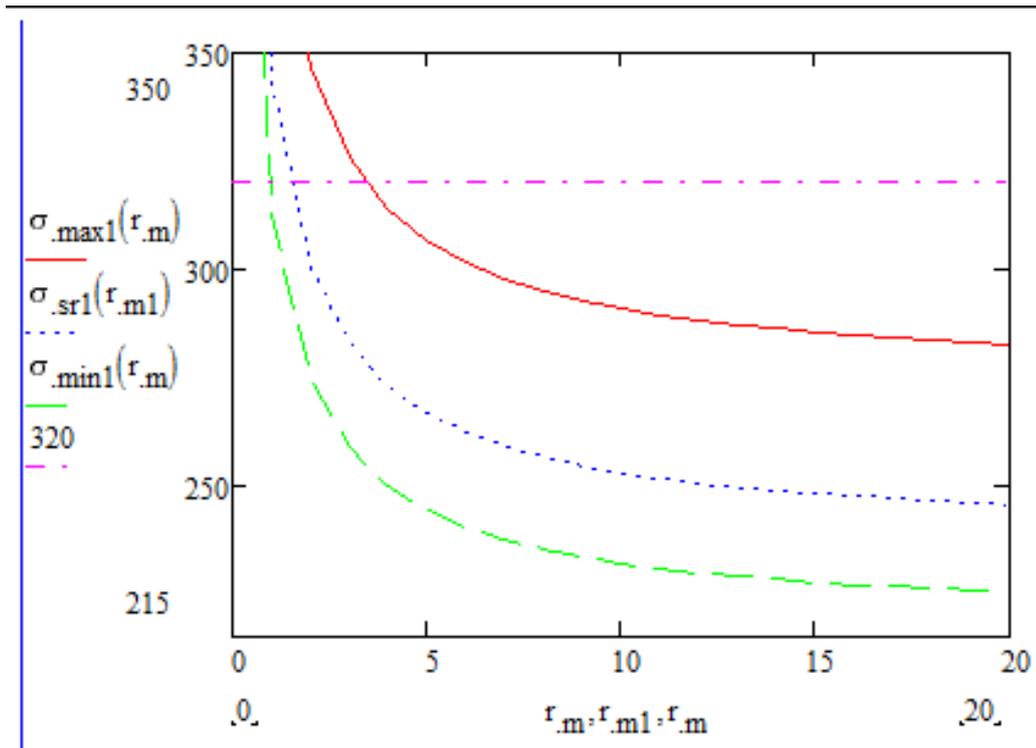


Рис. 2. Красным цветом показан график, соответствующий максимальному напряжению. Синей пунктирной линией показано математическое ожидание критического напряжения. Зеленой пунктирной линией показано значение минимального значения напряжения.

В результате аналитически получены следующие результаты:

Для высококачественного материала и смазки минимальный критический радиус пуансона, $r_m=1,1$ мм, при котором происходит разрушение материала и нарушение технологического процесса.

Для низкокачественного материала и смазки минимальный критический радиус пуансона $r_m=3,8$ мм

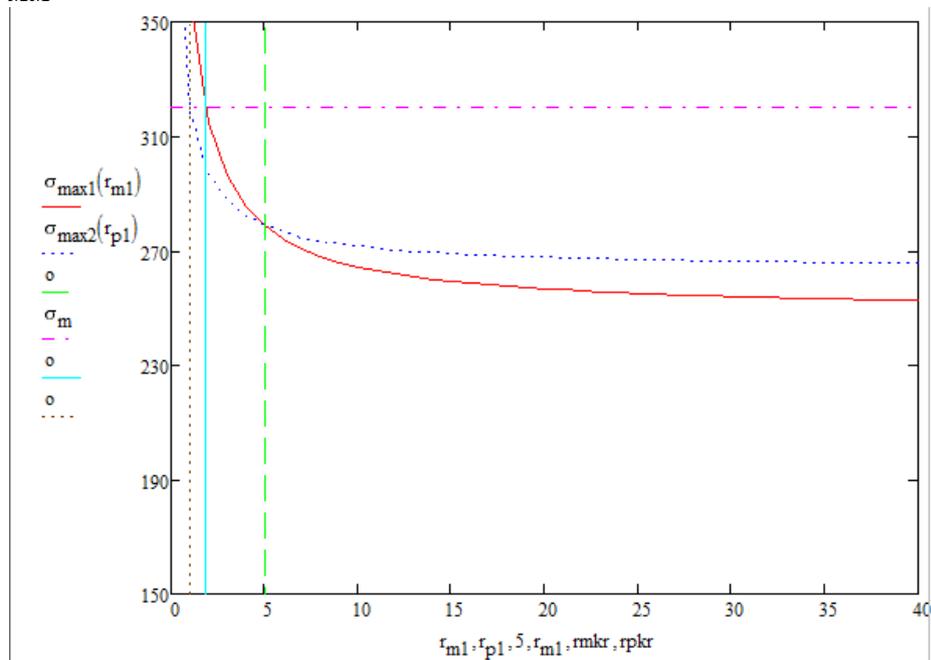


Рис. 3. Сравнение влияния радиусов инструментов.

Разрушение заготовки (в частности, отрыв дна) происходит при достижении σ_{rmax} (максимального растягивающего напряжения) 320 Н/мм^2 (ГОСТ 9045-93). На данном графике наглядно показывается влияние радиусов инструментов в сравнении. что при относительном радиусе $\frac{r}{s} > 5$ влияние пуансона оказывается большим, чем влияние радиуса матрицы, однако, при рабочих

Выводы:

При проектировании технологического процесса следует обратить внимание, что при относительном радиусе $\frac{r}{s} > 5$ влияние пуансона оказывается большим, чем влияние радиуса матрицы, однако, при относительном радиусе $\frac{r}{s} < 5$ влияние пуансона оказывается меньшим, чем влияние радиуса матрицы, причем критический радиус пуансона примерно в 2 раза меньше, чем критический радиус матрицы.

Литература

1. Справочник по листовой штамповке: /Демин В.А., Львович К.Д., Маркин П.В. и др. – М.: МГИУ, 2011. – 177 с. ISBN 978-5-2760-1928-4.
2. Справочник по листовой штамповке: /Романовский В.П. – Л.:Машиностроение. Ленинградское отделение. 1979-520с, ил.

УДК 621.7.043

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ РАБОЧЕГО СТОЛА 3D ПРИНТЕРА PROJET-1200

Андрей Платонович Кайбаров

Студент 4 курса

Кафедра «Технологии обработки давлением»

Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель: А.И. Алимов

Ассистент кафедры «Технологии обработки давлением»

В настоящее время широко распространена печать на 3D-принтерах. Эти принтеры состоят из большого количества компонентов, часть которых изготавливается с помощью штамповки. В частности, в данной статье рассматривается разработка технологического процесса изготовления рабочей платформы Projet 1200 (Рис. 1). Работа такого принтера осуществляется за счет нанесения фотополимерного материала слоями на рабочую поверхность стола и последующего его отверждения ультрафиолетом (рисунок 2). Большое влияние на точность изготавливаемых моделей оказывает размерная точность, параллельность плоскости рабочего стола по отношению к её креплению, а также ее плоскостность. Предложен процесс изготовления данной детали путем вырубки, гибки полки, совмещенной гибки в замкнутый контур и точечной сварки. При изготовлении возможно разрушение в зоне гибки, а также пружинение. С целью исследования данного технологического процесс было проведено полное моделирование совмещенной гибки детали в программных комплексах Autoform.



Рис. 1. Общий вид 3D-принтера ProJet 1200

Производство данной детали является мелкосерийным. Так как к детали не предъявляется больших прочностных требований материалом выбирается Сталь 08кп (относительно высокая прочность и дешевизна). По чертежу детали можно выявить следующие возможные трудности по изготовлению: получение внутреннего радиуса скругления величиной 0,5 мм, при толщине листа заготовки в 1,5 мм. Чертеж детали приведен на Рис. 3. Чертеж детали

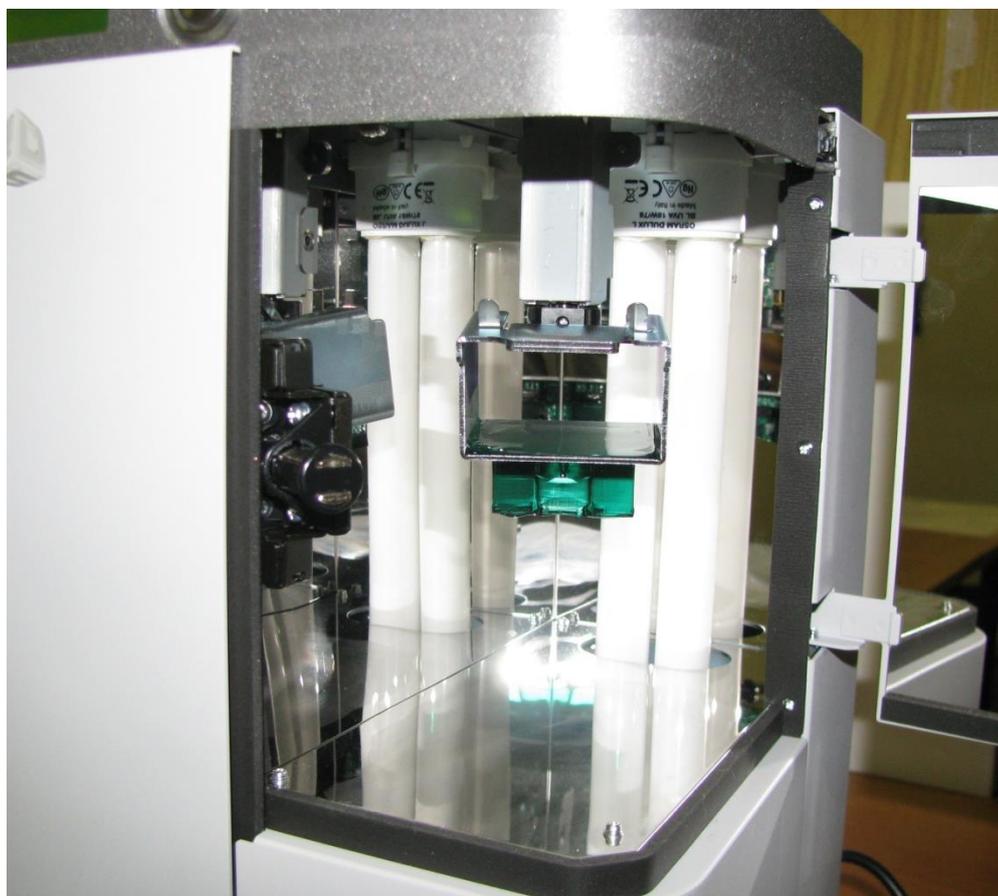
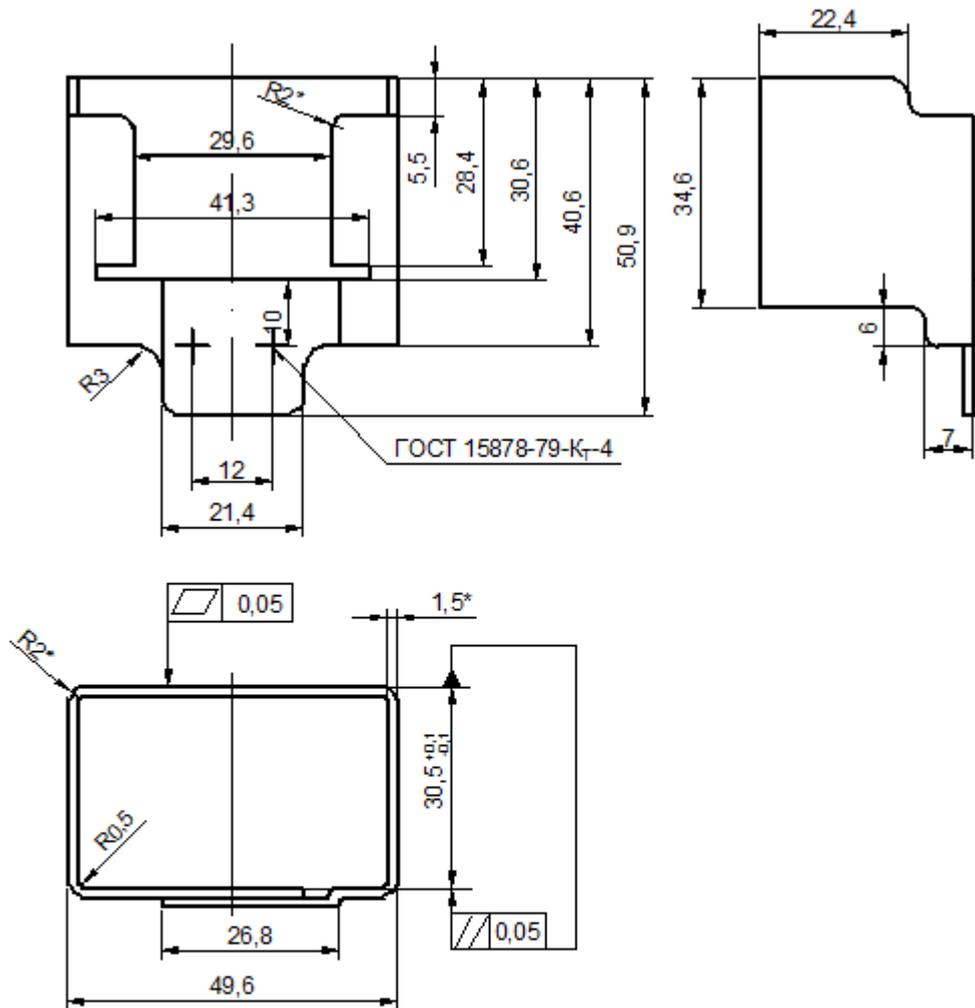


Рис. 2. Расположение рабочего стола в 3D-принтере



- 1.* - размер для справок
- 2. Общие допуски по ГОСТ 30893.2-мК
- 3. Неуказанные радиусы скруглений 2 мм
- 4. Шероховатость поверхности кромок \sqrt{Rz} 20

Рис. 3. Чертеж детали

Принимается следующая последовательность изготовления детали:

Таблица 1. Технологическая карта

Наименование операции	Инструменты
1) Резка листа на полосы	Гильотинные ножницы
2) Вырубка детали из полосы	Пресс КД2124, штамп вырубной
3) Пробивка перемычки	Пресс КД2124, штамп пробивной
4) Гибка полки	Пресс КД2124, штамп гибочный
5) Совмещенная гибка детали в замкнутый контур	Пресс КД2128, штамп гибочный совмещенного действия
6) Точечная сварка	Аппарат для электроконтактной сварки
7) Проверка ОТК	Измерительные инструменты

Совмещенная гибка осуществляется в 3 перехода: первым переход является П-образная гибка, вторым и третьим переходами являются поочередная гибка полок до их смыкания. П-образная гибка проходит при помощи центрального пуансона, который соприкасается с заготовкой в ее центральной части (Рис. 4). В результате чего заготовка начинает деформироваться и принимает вид, указанный на Рис. 5. Для того чтобы избежать образования выпуклости детали под пуансоном применяется прижим, имеющий ограниченный ход. На данном этапе деформация проходит без участия боковых ползушек, выполняется их ход приближения. Далее происходит поочередная гибка левой и правой полок. Причем боковые ползушки расположены так, что только по окончании деформирования левой полки начинается деформация правой (Рис. 6). Такой характер деформирования необходим для замыкания детали в замкнутый контур (Рис. 7).

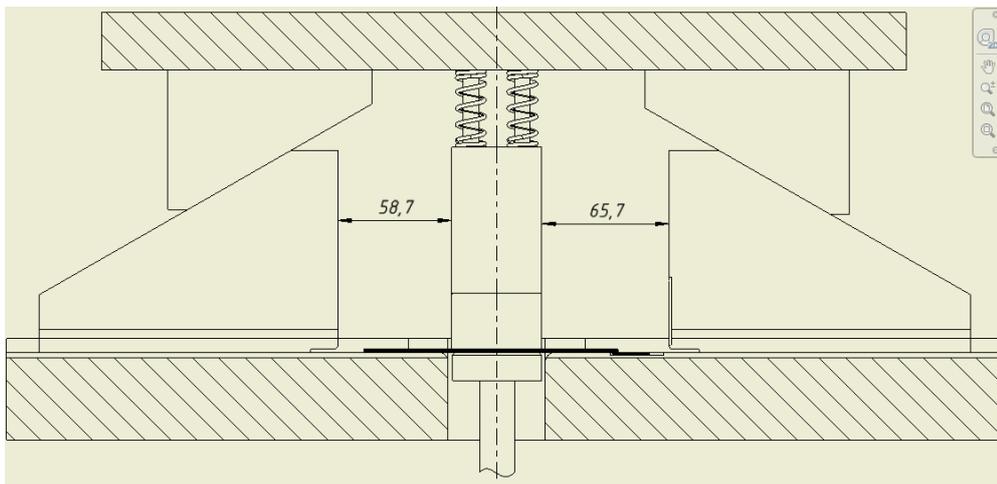


Рис. 4. Начало операции совмещенная гибка

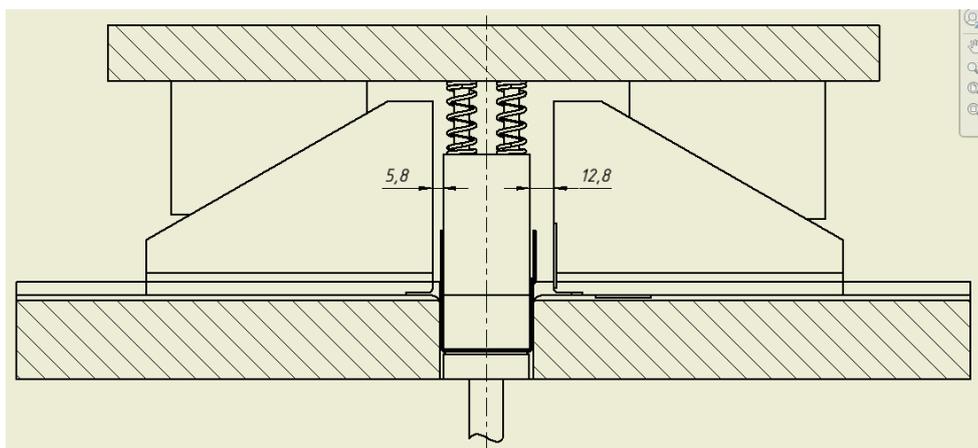


Рис. 5. Окончание П-образной гибки

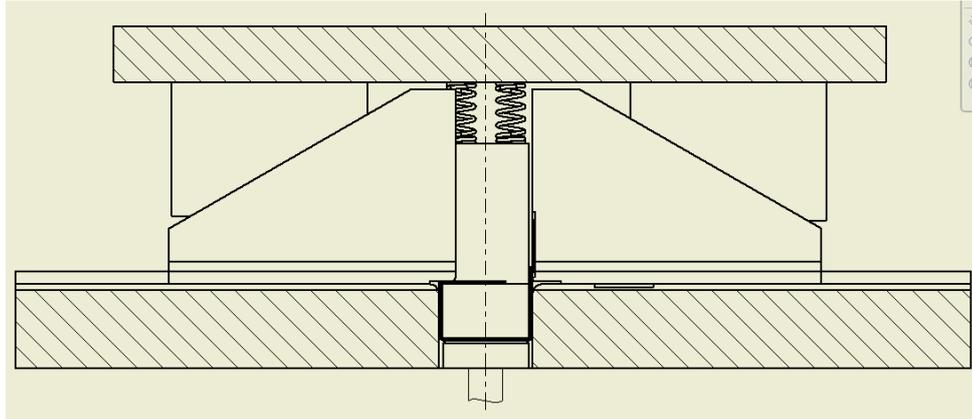


Рис. 6. Окончание гибки левой полки

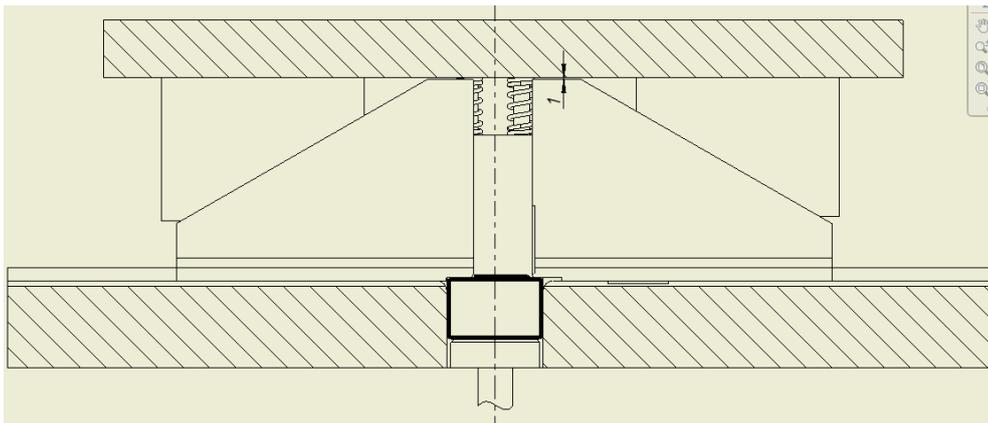


Рис. 7. Крайнее нижнее положение

Для подготовки расчета, необходимо произвести построение всех необходимых инструментов в программе Autodesk Inventor, либо в какой-либо другой аналогичной программе. Построение ведется через поверхности, сохранение выполняется в формате IGS, воспринимаемой программой Autoform. Стоит также отметить, что построение проводится в крайнем нижнем положении, то есть пуансон находится в том положении, в котором он должен закончить деформацию (Рис. 8).

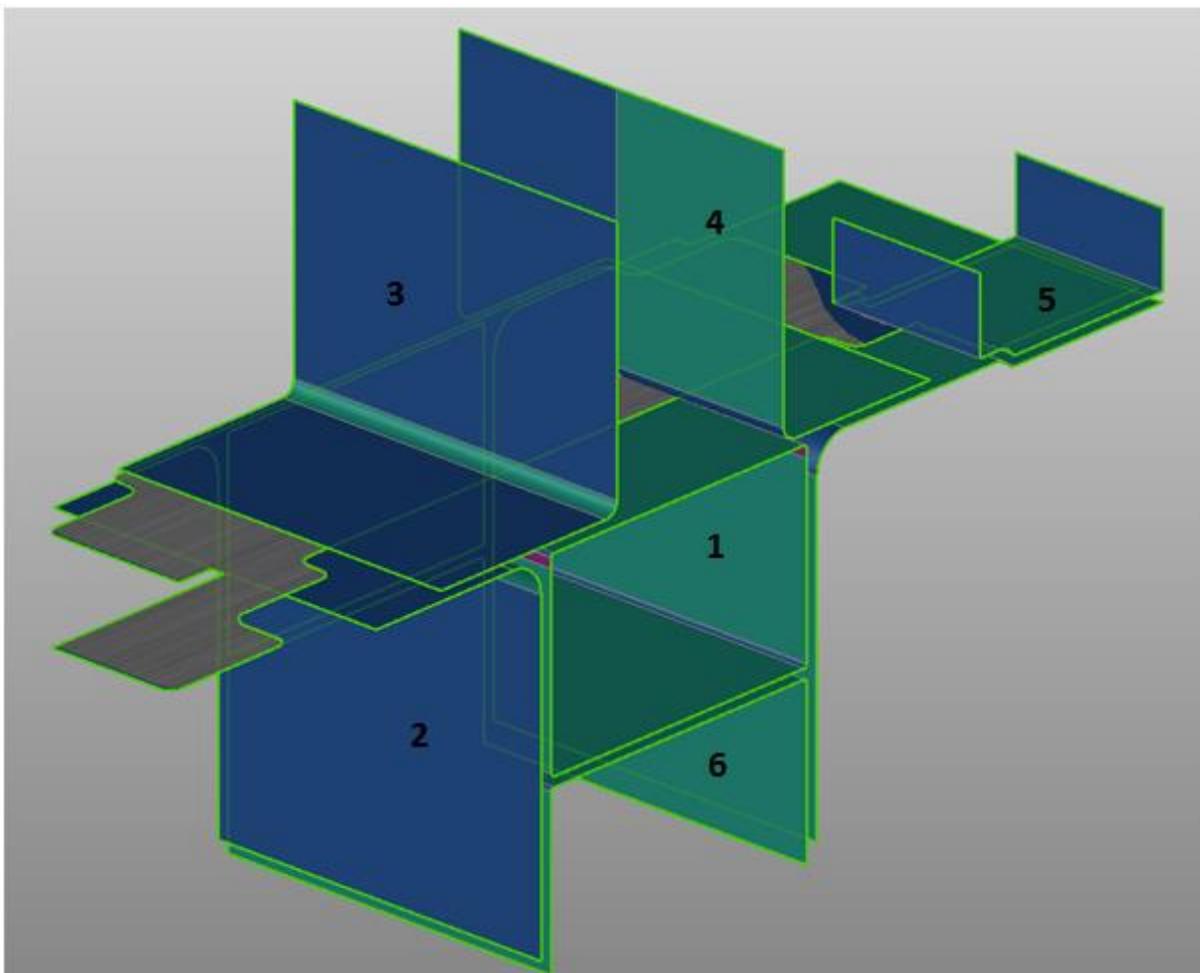


Рис. 8. Загруженная 3D-модель инструментов и заготовки

(1 – Пуансон для П-образной гибки, 2 – Матрица, 3 – Ползушка для гибки левой полки, 4 – Ползушка для гибки правой полки, 5 – Пуансон для гибки полки, 6 – Прижим)

Далее производится выбор материала заготовки, ее толщина и геометрия. Материалом детали является Сталь 08кп, но так как библиотека программы Autoform не содержит материалов ГОСТ, то выбирается аналог. Аналогом является сталь DC04, относящаяся к немецким стандартам. Свойства материала задаются несколькими кривыми (Рис. 9). Кривая упрочнения, которая дает зависимость величины напряжения (ось ординат), действующего в пластически деформируемом теле при линейном напряженном состоянии, от величины деформации (ось абсцисс). Поверхность текучести, определяющая величины главных максимальных (ось абсцисс) и минимальных (ось ординат) напряжений для перехода материала в пластическое состояние; FLD-диаграмма, показывающая предельные деформации материала. При деформациях выше черной кривой на графике приводит к разрушению материала. По оси абсцисс откладывается минимальные истинные деформации, по оси ординат – максимальные истинные деформации. Толщина заготовки выбирается в соответствии с толщиной детали (1,5 мм.). Геометрия выполняется совместно с геометрией инструментов и выбирается в пункте «Blank».

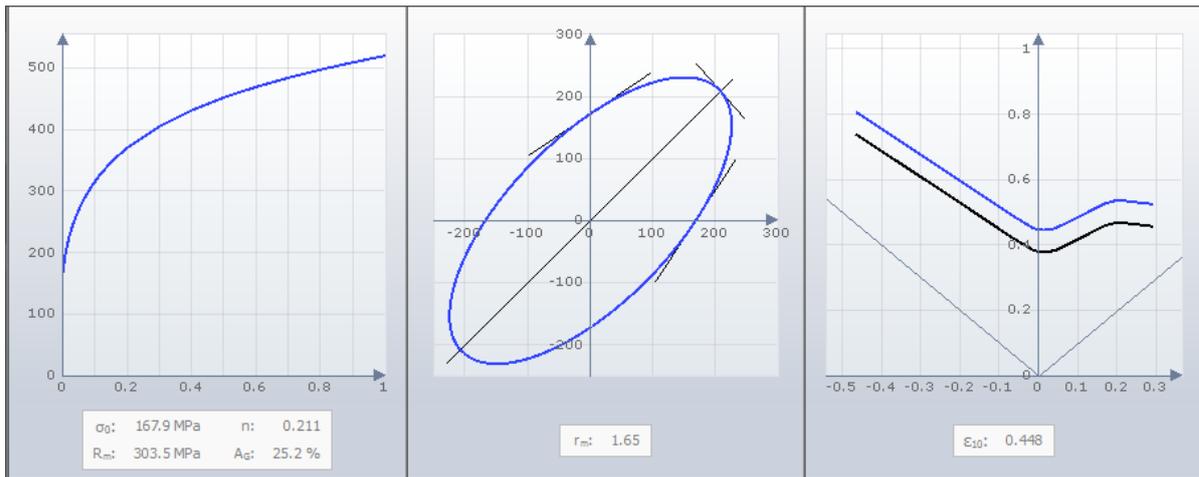


Рис. 9. Свойства материала DC04
(Кривая упрочнения, поверхность пластичности, FLD-диаграмма)

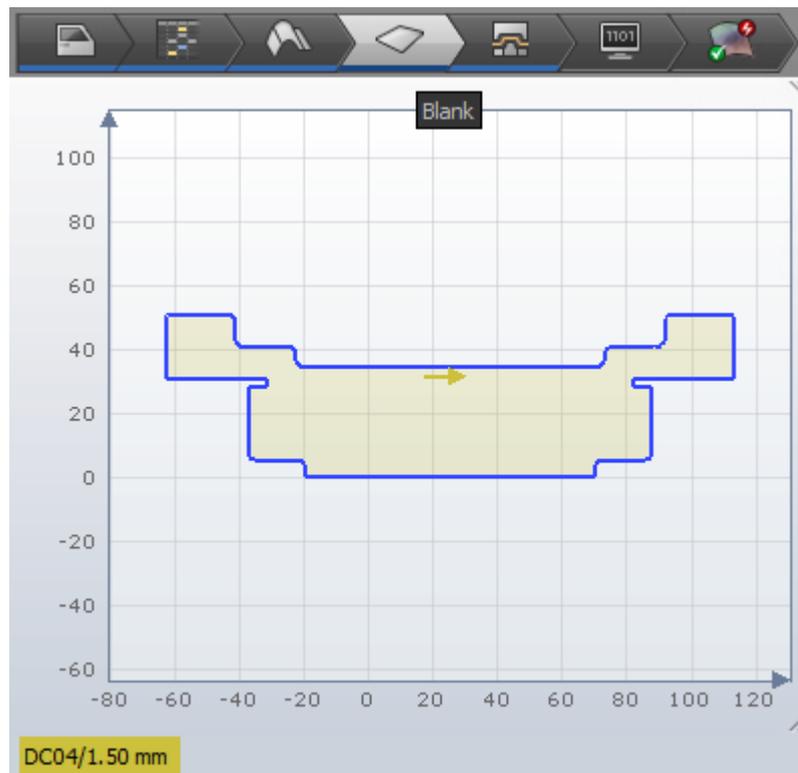


Рис. 10. Задание геометрии заготовки

Далее производится определение геометрии инструментов, параметры и направления их движения. Перед расчетом совмещенной гибки согласно предложенному технологическому процессу осуществлялась гибка полки (1).

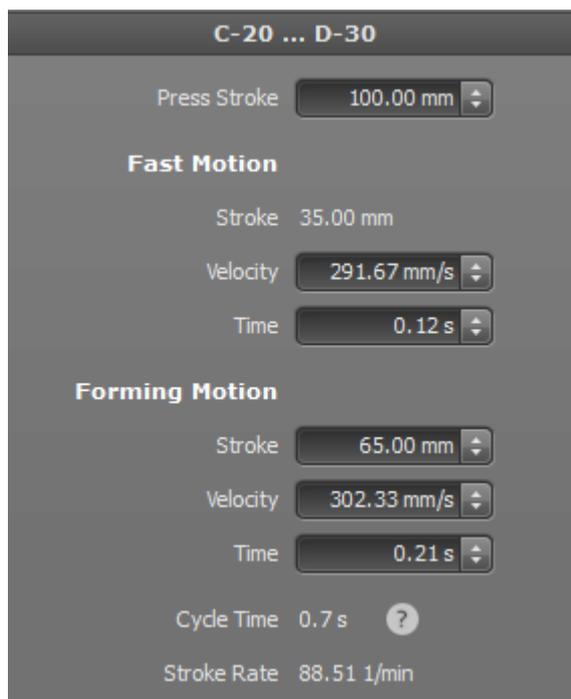


Рис. 11. Параметры движения инструмента

Движение рабочих инструментов в программе задается глобально для всех операций и может быть только кривошипным. Поэтому параметры их движения ограничиваются следующими параметрами: ход ползуна, время деформирования. При этом ход ползуна можно разделить на ход приближения и ход деформирования. Для хода деформирования задается ход и время, свободный же ход задается только через время, а величина хода определяется как разность хода ползуна и хода деформирования. Скорость деформирования и число оборотов задается из расчета вышеуказанных параметров. Параметры устанавливаются в соответствии с выбранным прессом: ход ползуна – 100 мм, ход деформирования – 65 мм, число оборотов в минуту – 90 (Рис. 11).

В ходе расчетов возникли проблемы с адекватностью расчетов детали в результате гибки. При гибке очаг деформации локализуется в зоне гибки, но расчет показывал результаты больше похожие на операцию вытяжки (Рис. 12). То есть получалось затягивание материала в пространство между пуансоном и матрицей. Для устранения этой проблемы было принято решение увеличить точность расчета уменьшением максимального размера конечного элемента и выбор иного типа конечного элемента. В параметрах расчета устанавливается тип элементов: либо ВЕМ (bending enhanced membrane) либо EPS (elastic plastic shell). По умолчанию тип элемента стоит ВЕМ, который применяется для предварительного расчета глубокой вытяжки тонких деталей и обладает приближенной жесткостью при изгибе. Для повышения точности выбирается тип элементов EPS. Результаты расчета приведены на рисунке 9.

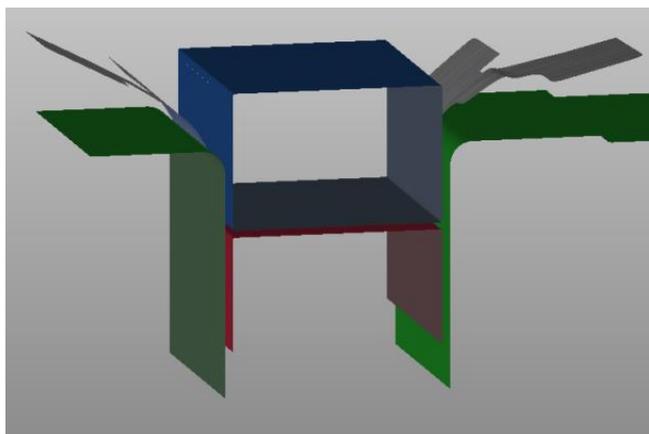


Рис. 12. Неверный расчет

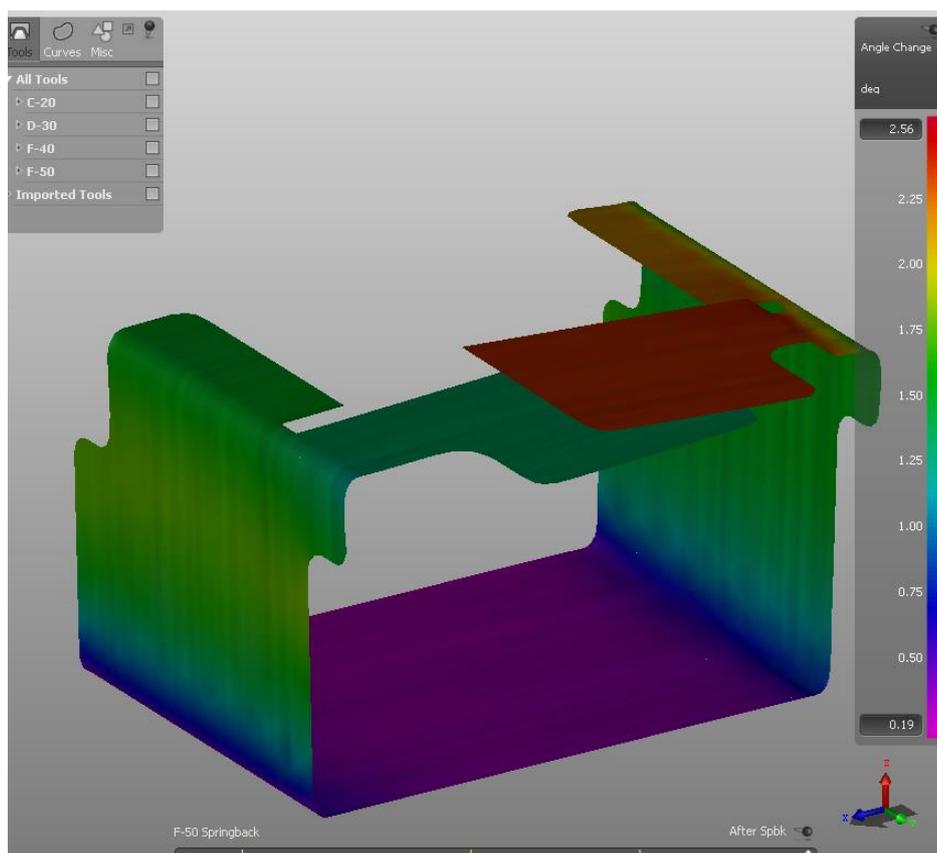


Рис. 13. Пружинение детали

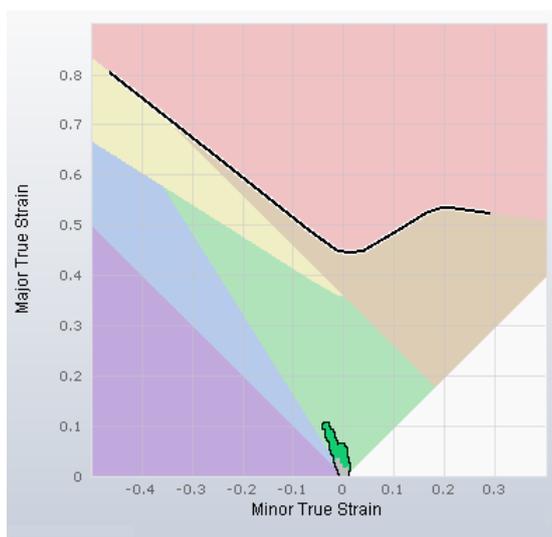


Рис. 14. FLD-диаграмма

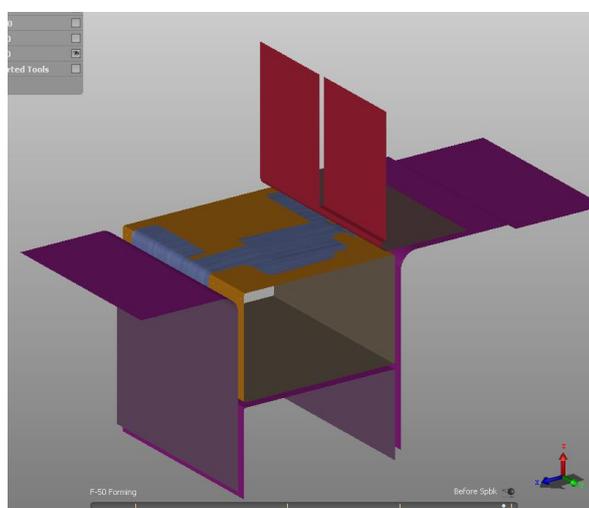
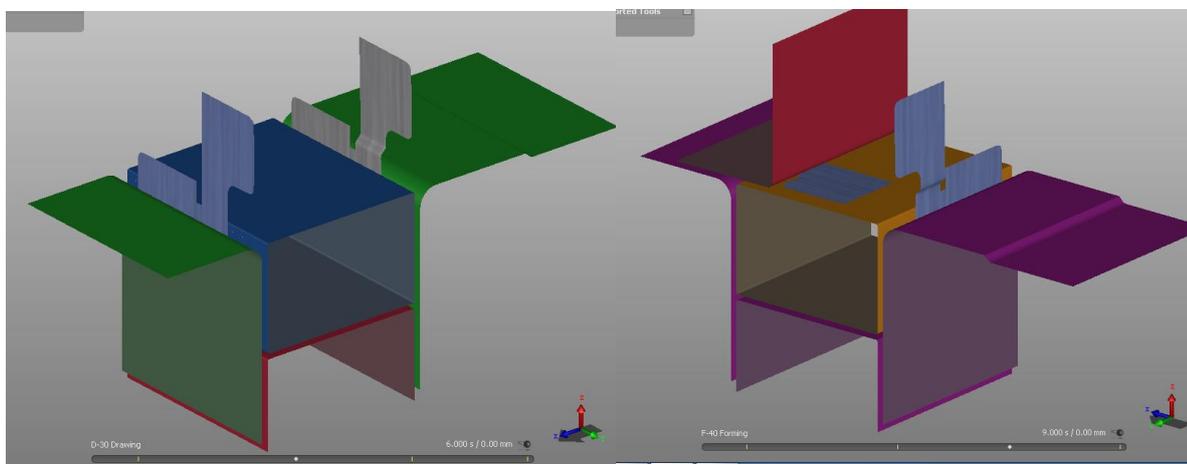


Рис. 15. Полученные переходы деформирования

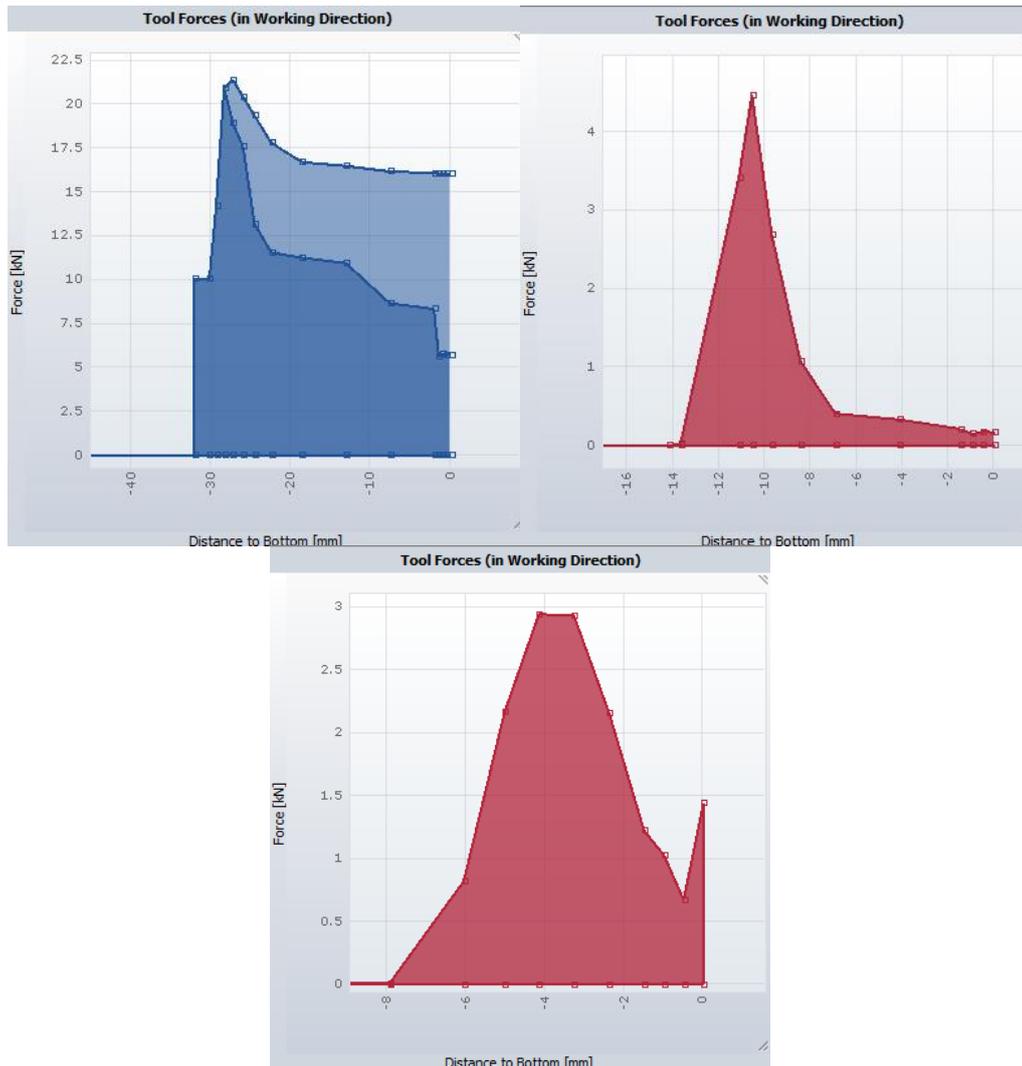


Рис. 16. Графики сил

(П-образная гибка, гибка левой полки, гибка правой полки)

По результатам расчета можно сделать вывод, что данный технологический процесс является полностью осуществимым без каких-либо дефектов, влияющих на предъявляемое качество детали. Как видно на FLD-диаграмме предполагаемое разрушение детали в угловых частях не возникло, практически все точки на диаграмме находятся в безопасной зоне. Одним из требований, предъявленным к детали является плоскостность рабочей поверхности. Данное требование достигается за счет совместной работы центрального пуансона и прижима. Рабочая поверхность заготовки зажимается между ними и достигает плоскостности, соответствующей плоскостности прижима. Пружинение детали наблюдается в боковых стенках и на верхних полках, и достигает максимального значения в размере $2,56^\circ$ в правой полке. Такое пружинение никак не повлияет на дальнейшую операцию сварки, так как совмещение левой и правой полки можно осуществить вручную. Для борьбы с пружинением можно уменьшить угол пуансона на угол пружинения либо выполнить небольшой радиусный выгиб средней полки (Рис. 17).

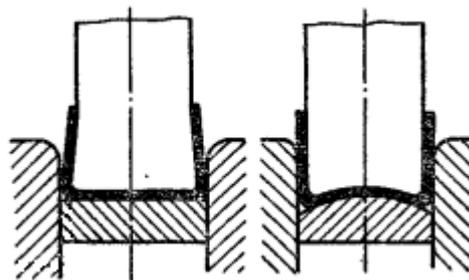


Рис. 17. Возможные способы борьбы с пружинением

Литература

1. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка/Под общ. ред. Л. И. Рудмана. – М.: Машиностроение, 1988. – 496 с.: ил. – (Б-ка конструктора).
2. Справочник по холодной штамповке. – 6-е издание., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1979. – 520 с., ил.
3. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-ч т. Т.1. – 9-е изд., перераб. И доп./ под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006. – 928 с.

УДК 621.7.043

ПОИСК ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ДЕТАЛИ ТИПА «ПАТРУБОК»

Александр Владимирович Лазуткин

Студент 4 курса

кафедра «Технологии обработки металлов давлением»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Е.Н. Складчиков

доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки металлов давлением»

Деталь типа "Патрубок" имеет признаки конусной и коробчатой детали. В технической литературе приведены рекомендации по штамповке высоких конусных деталей и глубокой вытяжки коробчатых изделий [1],[2]. При этом рекомендации по проектированию технологических процессов штамповки деталей, обладающих признаками обоих типов практически отсутствуют.

При выборе технологического процесса штамповки детали типа "Патрубок" было рассмотрено 6 вариантов техпроцессов. При этом критериями выбора того или иного технологического решения являлись отсутствие разрыва, образования складок, сокращение расхода материала.

В ходе рассмотрения вариантов изготовления детали был проведен ряд исследований, которые проходили в несколько этапов и освещают такие вопросы, как:

- расчет размеров и определение оптимальной геометрической формы заготовки
- возможность штамповки детали за один переход
- влияние коэффициента трения на процесс штамповки
- влияние силы прижима на процесс складкообразования

- рациональность применения вытяжных ребер.

Исследования были проведены в программном комплексе Autoform^{plus} R5.1.

Чертеж и трехмерная модель детали "Патрубок" из стали 08кп представлены на рис.1 и 2 соответственно:

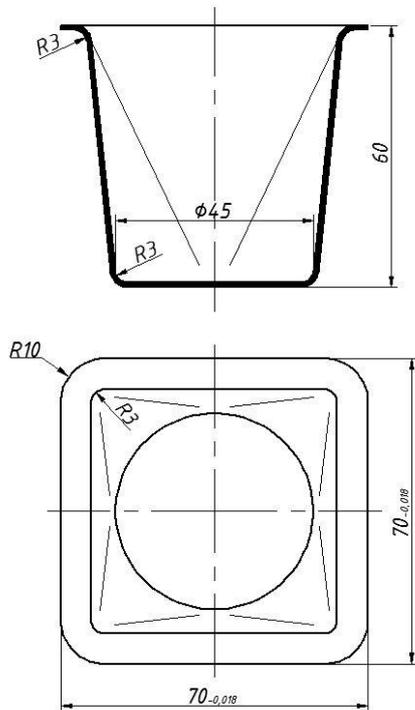


Рис. 1. "Патрубок" 2D

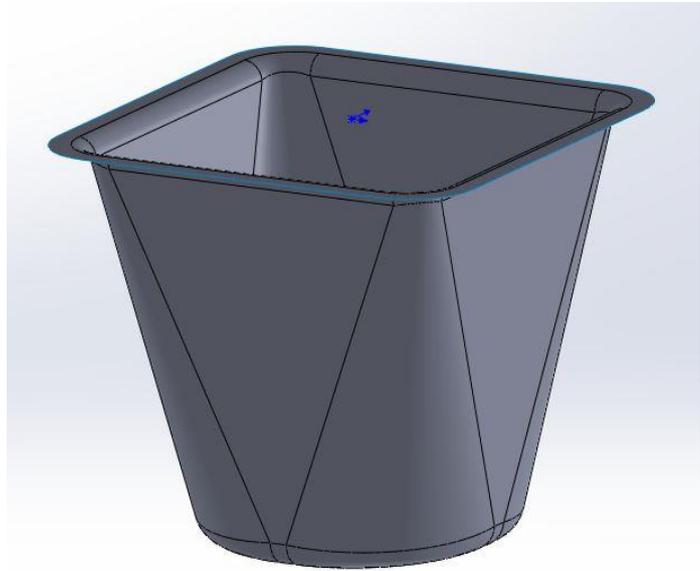


Рис. 2. "Патрубок" 3D

После анализа детали на технологичность на основе рекомендаций по штамповке коробчатых изделий [1],[2], было отмечено, что малые радиусы скруглений на рабочих частях матрицы и пуансона и угловых закруглений коробчатой детали могут препятствовать нормальному протеканию процесса штамповки.

Но, так как деталь типа "Патрубок" содержит не только признаки коробчатых деталей, интересно рассмотреть проектирование технологического процесса, обеспечивающего получение оптимальных параметров готовой детали, и применение которого было бы целесообразно.

Первым этапом проектирования технологического процесса является определение размеров исходной плоской заготовки. Расчет производится из условия постоянства площади поверхности детали. Площадь срединной поверхности готовой детали рассчитана с помощью встроенного модуля в программе SolidWorks (рис.3):

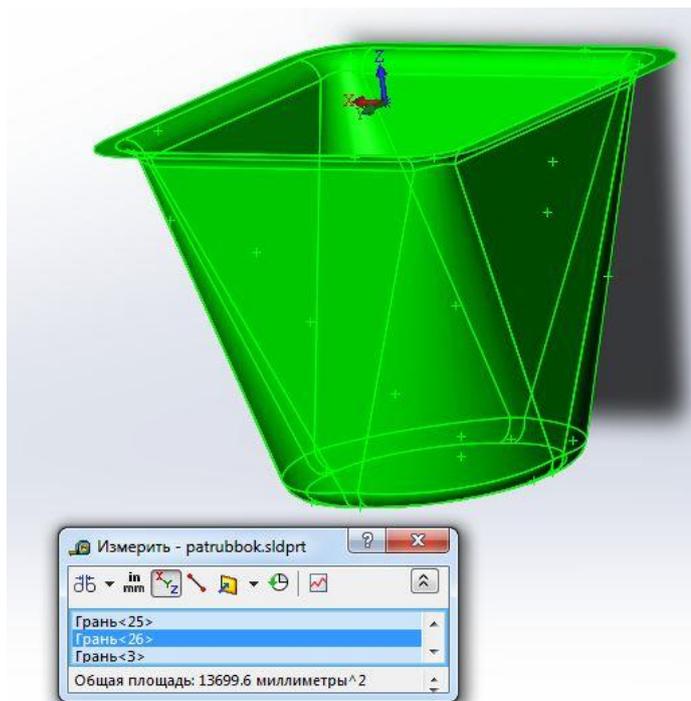


Рис. 3. Площадь срединной поверхности

Суммарная площадь срединной поверхности $F_{\text{сум}} = 13700 \text{ мм}^2$.

Для предварительных расчетов были выбраны 4 типа заготовок, контуры которых ограничены простейшими геометрическими фигурами, и которые могли бы быть использованы для штамповки конусной или коробчатой детали. Таковыми являются: круг, квадрат, квадрат со скругленными углами, квадрат с фаской (см. рис. 4):

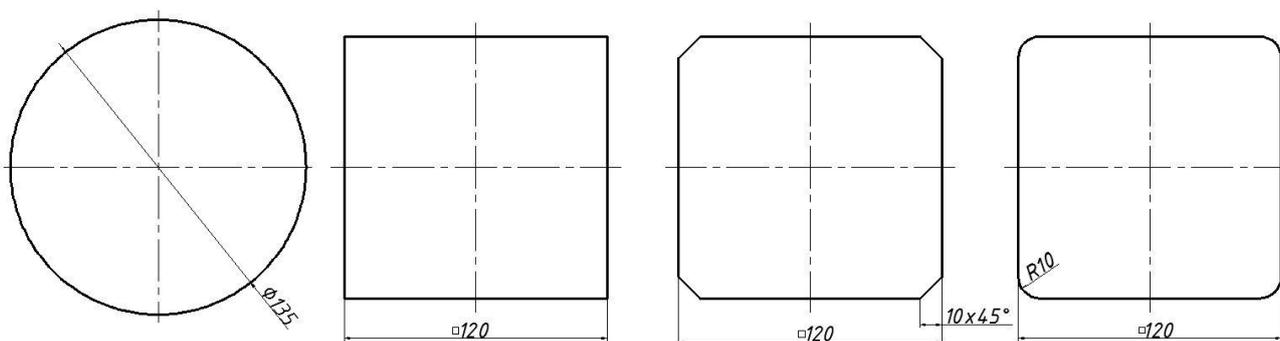


Рис. 4. Эскизы заготовок.

Значение припуска на обрезку фланца принимаем из условия $k \geq (1,5 - 2)S$ для обеспечения гарантированного отделения отхода от готовой детали.

С учетом припуска на обрезку фланца, размер квадратной заготовки: $a=120 \text{ мм}$.

Диаметр круглой заготовки вычисляем по формуле [1]:

$$D_3 = 1,13 \cdot \sqrt{F_{\text{сум}}} = 133 \text{ мм},$$

с учетом припуска на обрезку: $D_3 = 135 \text{ мм}$.

Основой заготовок квадрат со скругленными углами и квадрат с фаской служит квадрат со стороной $a=120 \text{ мм}$, размер фаски - $10 \times 45^\circ$, радиус скругления - $r = 10 \text{ мм}$ (см. рис. 4).

Предварительные исследования позволили оценить характер течения металла в процессе штамповки и сделать ряд выводов относительно выбора геометрической формы и размеров исходной заготовки. Результаты моделирования приведены ниже:

1) Круглая заготовка

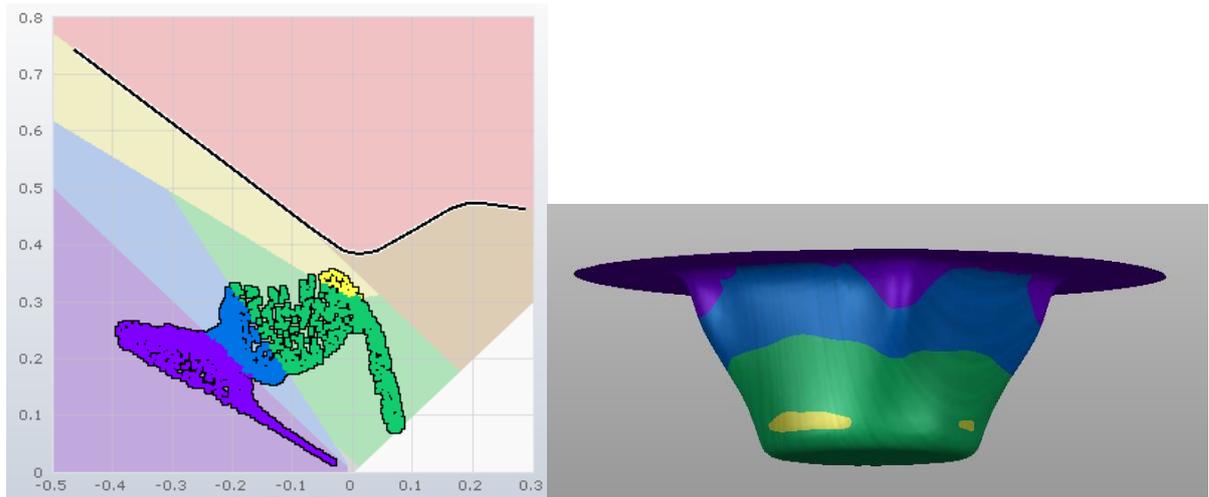


Рис. 5. Момент превышения предельных напряжений

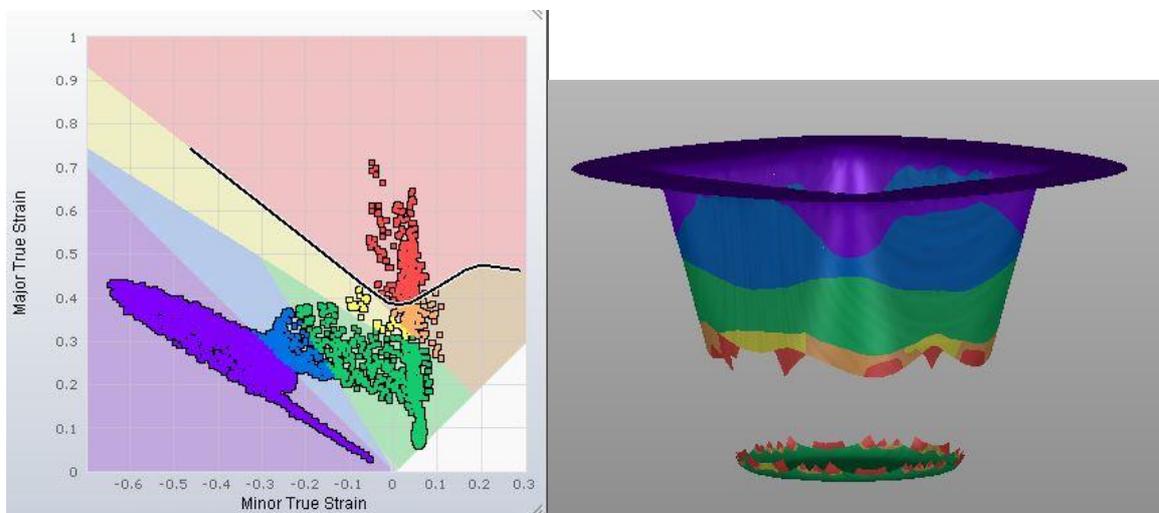


Рис. 6. Конечный момент деформирования

Результат моделирования с использованием круглой заготовки - превышение допустимых напряжений и последующий отрыв доньшка.

2) Квадратная заготовка

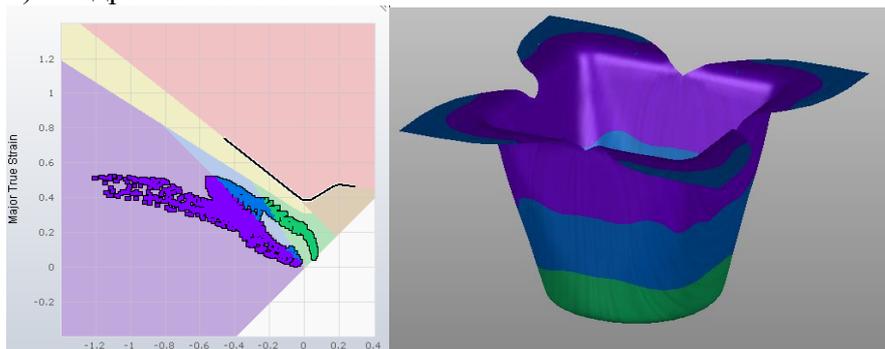


Рис. 7. Диаграмма FLD для квадратной заготовки

Результаты моделирования - избыток металла в угловых зонах и его недостаток в направлениях осей симметрии.

3) Квадрат со скруглениями

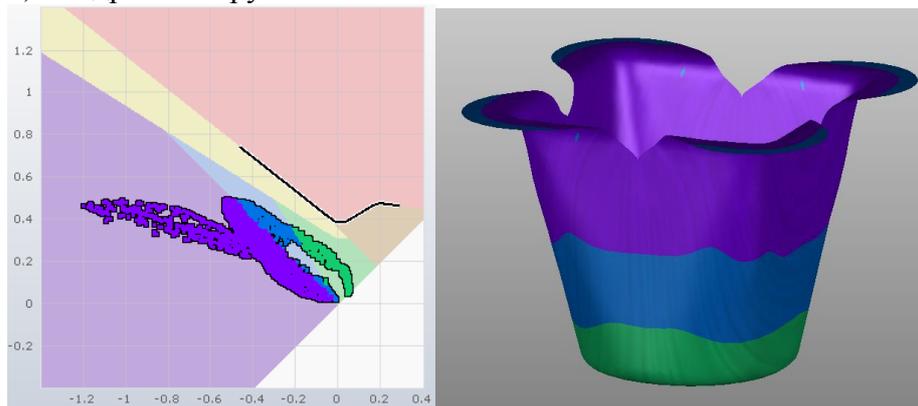


Рис. 8. Диаграмма FLD для заготовки квадрат со скруглениями

4) Квадрат с фаской

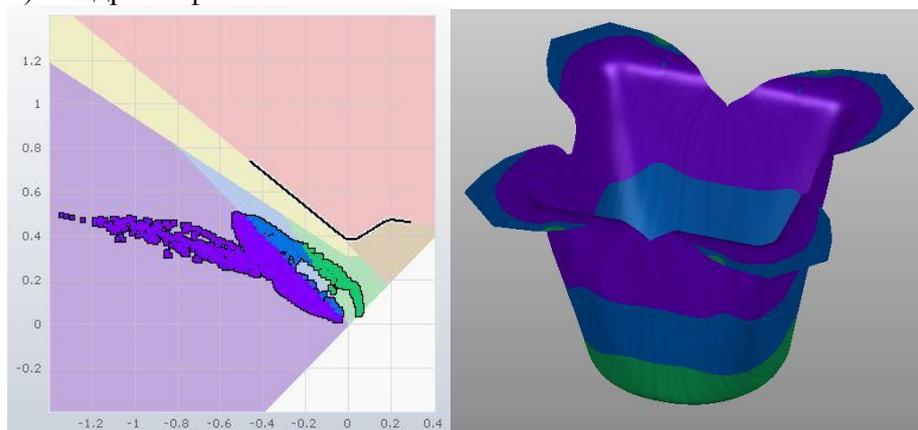


Рис. 9. Диаграмма FLD для заготовки квадрат с фаской

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что при использовании круглой заготовки данных размеров процесс штамповки происходит отрыв доньшка, что не происходит при деформировании заготовок других типов на основе квадрата.

Также стоит отметить, что превышение допустимых напряжений происходит не на начальном этапе деформирования, как при операции вытяжки, а, практически на половине хода пуансона, при этом опасные зоны появляются на прямолинейных участках деформируемой заготовки. Причиной отрыва доньшка при использовании круглой заготовки является характер течения металла в процессе деформирования. На рис. 10 и рис. 11 представлены проекции деталей, полученных в процессе штамповки, на плоскость XOY и соответствующие им заготовки. Данные изображения показывают, что металл наиболее интенсивно затягивается в матрицу в направлениях, соответствующих осям симметрии, параллельным прямолинейным участкам детали, и, в дальнейшем, перераспределяется и в угловые зоны. Это хорошо заметно при рассмотрении квадратных заготовок. При этом доньшко и прилегающая зона практически не деформируется, как при классическом процессе вытяжки. При использовании круглой заготовки течение материала в этих направлениях затруднено в силу особенностей геометрии - металл во фланце во всех направлениях распределен равномерно.

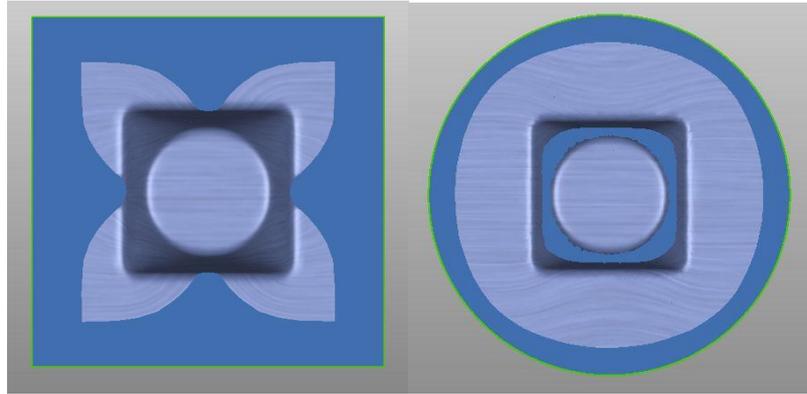


Рис. 10. Квадратная и круглая заготовки

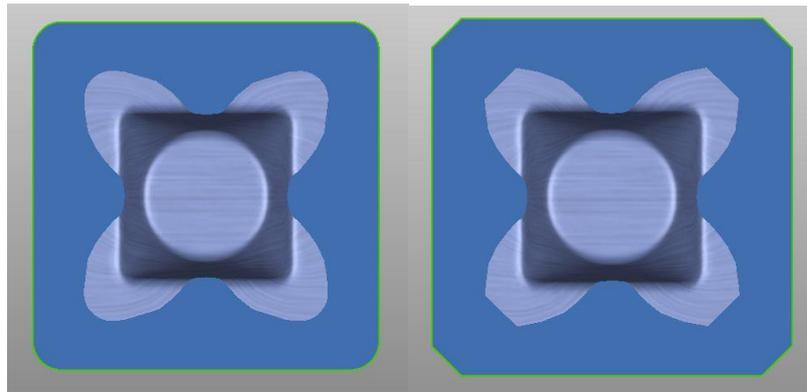


Рис. 11. Квадрат со скруглением и с фаской

С другой стороны, при использовании квадратных заготовок одновременно с лучшими условиями деформирования присутствуют значительный избыток металла в угловых зонах и его недостаток в направлениях осей симметрии, параллельных прямолинейным участкам заготовки. Поворот квадратной заготовки на 45° также не привело к формированию фланца достаточных размеров:

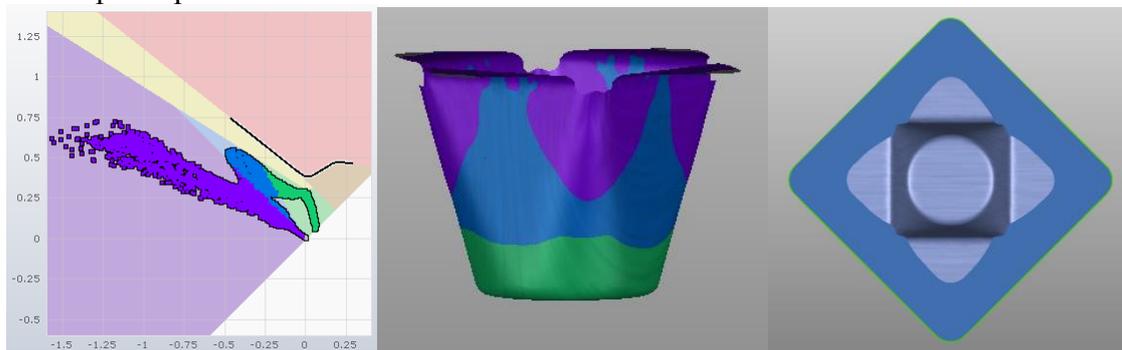


Рис. 12. Квадратная заготовка с поворотом на 45°

Исходя из анализа результатов предыдущих исследований, было принято решение о продолжении поиска оптимальной формы заготовки на основе квадрата со стороной $a=120$ мм, путем исключения избытка металла в угловых зонах и его добавления в зоны с недостатком материала во фланце.

Первым шагом являлась минимизация избытка металла в угловых зонах. С этой целью изменялся размер фаски на исходной заготовке, в качестве выходного параметра фиксировался диагональный размер фланца с учетом припуска на обрезку. Ниже представлены таблица результатов исследования, эскиз эталона фланца и изображение полученной детали:

Таблица 1. Таблица результатов

№ Эксперимента	Размер фаски, мм	Диagonalный размер фланца, мм
1	20	95
2	25	89,4
3	22	93

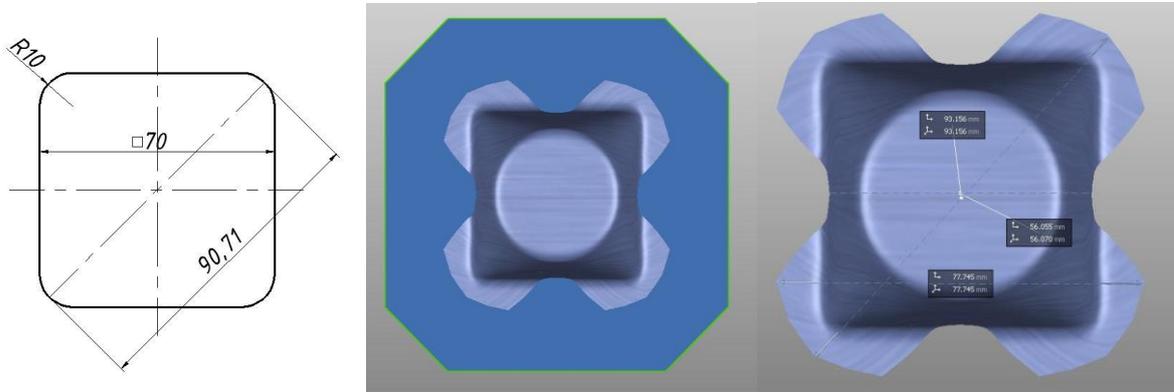


Рис. 13. Эталон фланца, выбранный вариант

Вторым шагом подбора заготовки являлся непосредственно выбор геометрической формы. Геометрию заготовок, используемых при моделировании, условно можно разделить на две группы: основой которых является квадрат с фаской и квадрат со скруглением, которое строится с помощью окружности, касательной к фаске исходной заготовки:

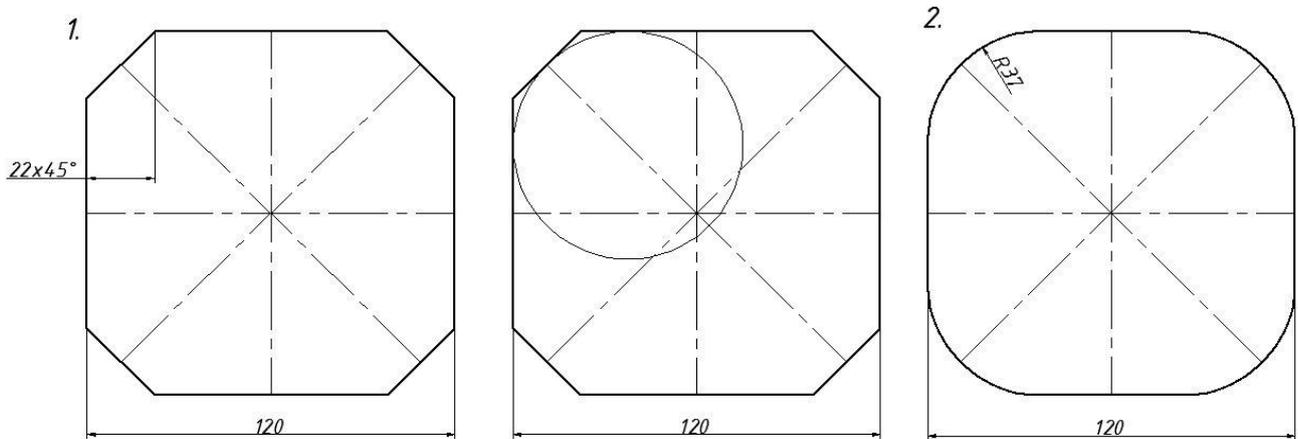


Рис. 14. Группы рассматриваемых заготовок

Добавление металла в направлениях максимальной интенсивности течения в форме дуг со скруглениями с целью обеспечения необходимых размеров фланца готовой детали привело к недостатку материала во фланце заготовки в зонах сопряжения основной и добавленных площадей.

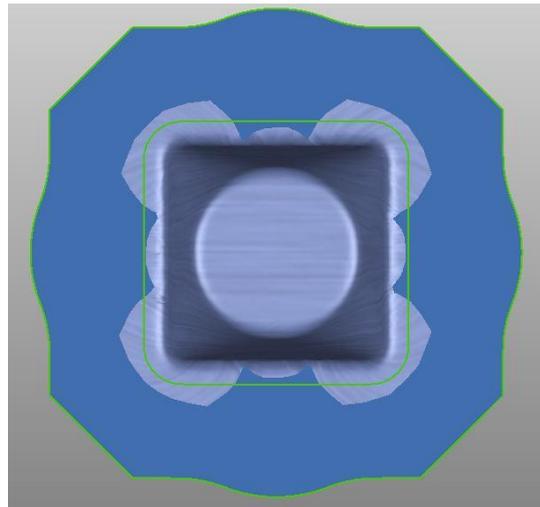


Рис. 15. Результат добавления металла

Также остался излишек металла в угловой зоне, поэтому было принято решение об изменении формы заготовки. Были рассмотрены следующие варианты: добавление участков, образованных прямыми и участки, образованные дугами, которые, вместе с тем, уменьшали площадь исходной заготовки в области фаски:

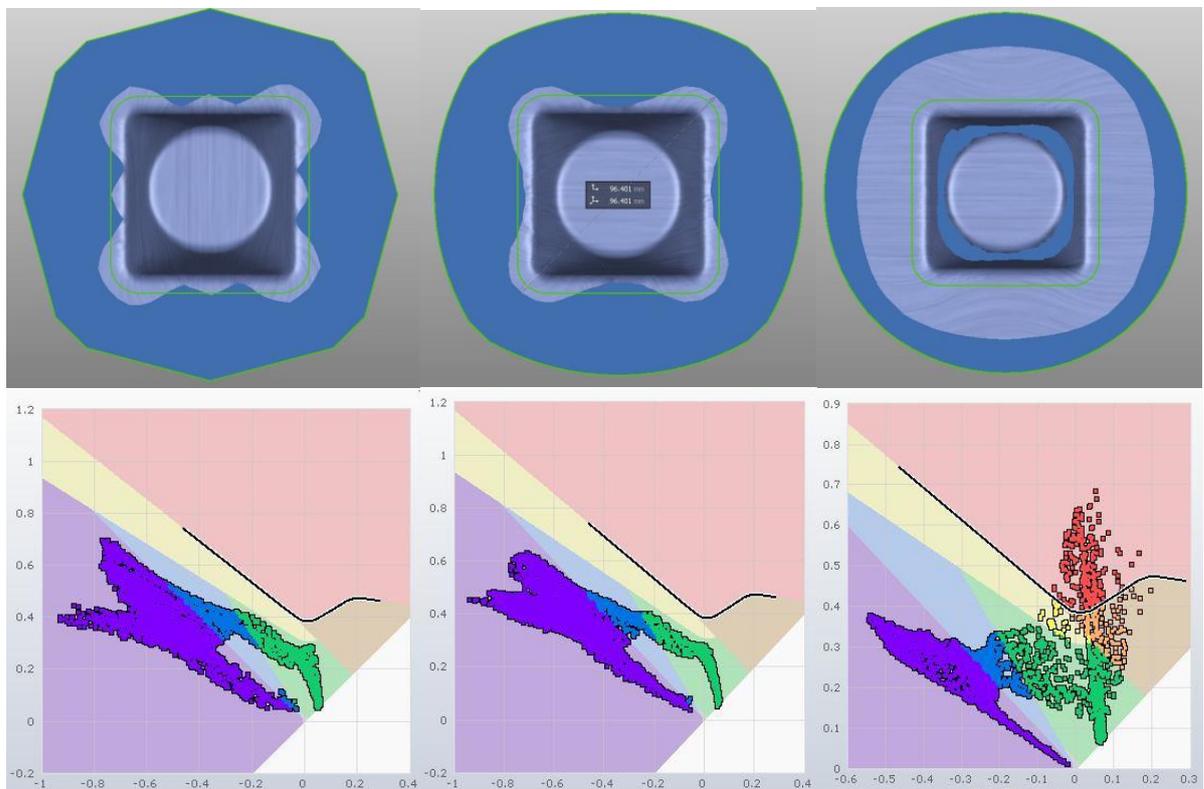


Рис. 16. Заготовки первой группы

В случае заготовок с прямолинейными участками можно отметить присутствие тех же проблем, что и в предыдущей - недостаток материала во фланце в зонах сопряжения и избыток металла в угловой зоне, а при увеличении добавляемой площади деталь претерпевает разрыв (это хорошо видно при рассмотрении заготовок второй группы).

При рассмотрении заготовок с добавляемой площадью, образованной дугами окружностей, наблюдается нехватка металла во фланце, а диапазон изменения размеров довольно мал, и небольшое увеличение заготовки приводит к разрыву (см. Рис. 16).

Замена фаски на скругление соответствующего радиуса для заготовок второй группы была применена для уменьшения избытка металла в угловой зоне. Для заготовок этой группы также была рассмотрена возможность добавления площади прямолинейными участками:

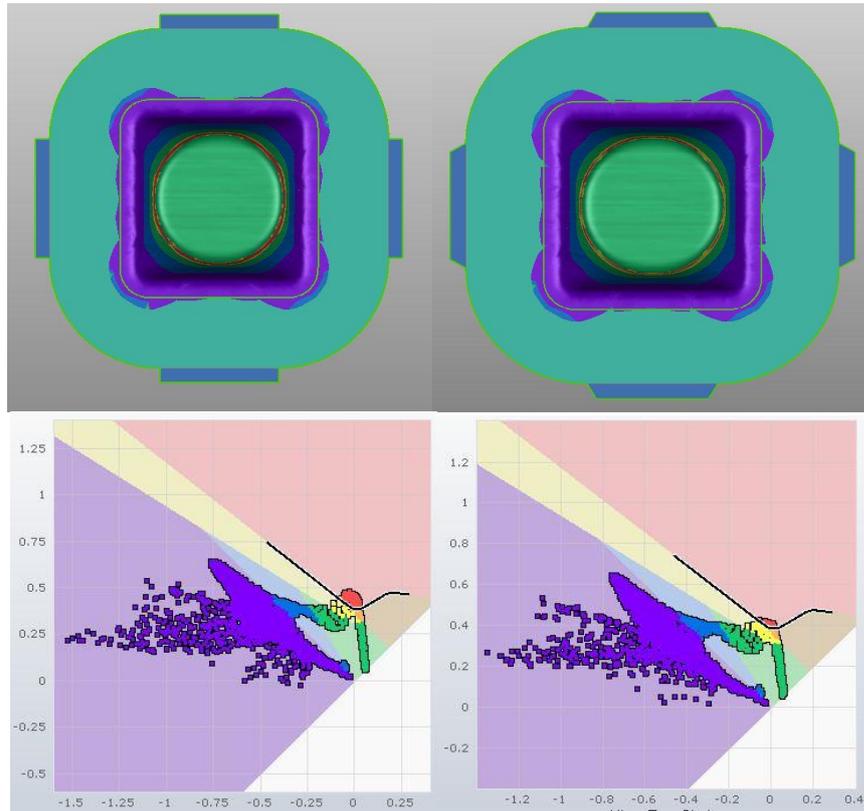


Рис. 17. Заготовки второй группы

Как видно из результатов моделирования, заготовки второй группы имеют два отрицательных момента: нехватка материала во фланце заготовки в зонах сопряжения основной и добавленных площадей, и отрыв доньшка или превышение допустимых напряжений в опасном сечении даже при небольшом размере добавки.

Следующим шагом поиска оптимальной геометрической формы исходной заготовки являлась попытка совмещения штампуемости заготовок первой группы и увеличения ее площади таким образом, чтобы обеспечить достаточное количества металла во фланце, исключить излишки в угловых зонах. Эскиз заготовки и результаты исследований представлены ниже:

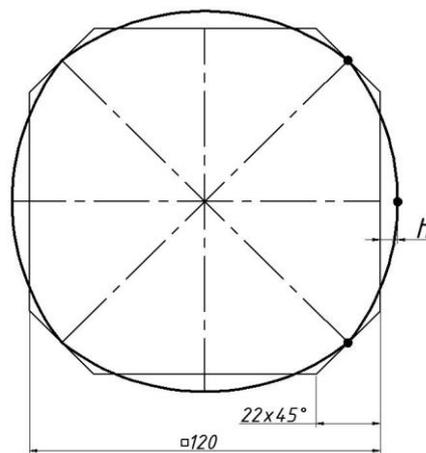


Рис. 18. Эскиз заготовки

Данная заготовка построена на основе квадратной с фаской 22x45° и состоит из четырех дуг окружностей, проходящих через три фиксированные точки. Основным параметром, с помощью которого можно изменять размеры исходной заготовки, выбрана высота h. Отметив, что новая заготовка приняла форму, близкую к окружности и, учитывая малый диапазон изменения ее размеров до появления разрыва при штамповке, были выбраны следующие варианты:

Таблица 2. Таблица результатов исследований

№ Эксперимента	Размер h, мм	Характер формообразования	Глубина вытяжки без разрыва, мм
1	3	Недостаточное количество металла во фланце готовой детали	Полная вытяжка
2	4	----	Полная вытяжка
3	6	Отрыв доньшка	40
4	5	Превышение предельных напряжений	47

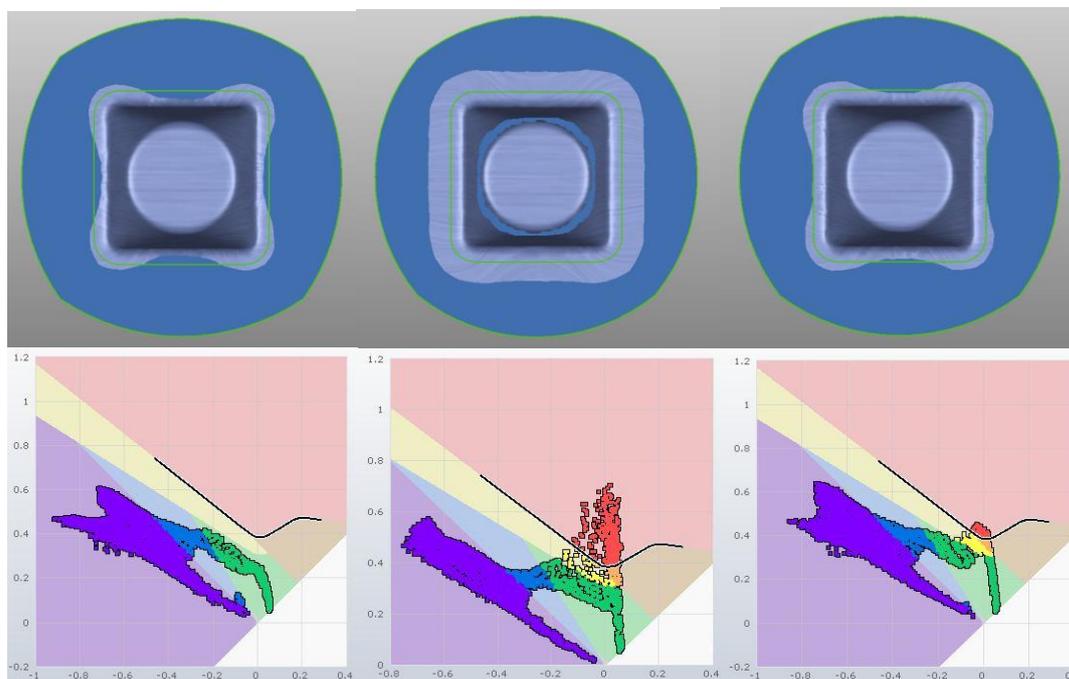


Рис. 19. Заготовки с различными значениями h

Проанализировав данные, полученные в ходе исследований, посвященных поиску оптимальной геометрической формы, можно сделать вывод, что наиболее подходящими являются фигурная (состоящая из дуг окружностей) и, близкая к ней по форме, круглая. Данный выбор основан на удовлетворении основных критериев: наиболее рациональное использование площади заготовки (т.е. баланс между минимизацией избытков в угловых зонах и полнотой формирования фланца), отсутствие неисправимых браков, присутствующих в остальных фигурных заготовках (например, недостаток материала в зонах сопряжения).

Также можно сделать вывод о том, что при данных условиях протекания процесса штамповки практически невозможно добиться желаемых параметров готовой детали - происходит разрыв или превышение допустимых напряжений в опасном сечении при увеличении заготовки с целью обеспечения оптимальных размеров фланца с учетом припуска на обрезку.

В связи с этим, было принято решение о уменьшении коэффициента трения на рабочих поверхностях инструмента, то есть применить смазку более высокого качества.

Для круглых заготовок диаметром $d=135$ мм и $d=134$ мм результаты исследований в условиях уменьшенного коэффициента трения представлены в сводной таблице:

Таблица 3. Результаты моделирования с круглыми заготовками

d=135 мм			d=134 мм		
к-т трения	Результат	Глубина вытяжки без разрыва, мм	к-т трения	Результат	Глубина вытяжки без разрыва, мм
0,13	отрыв доньшка	39	0,13	отрыв доньшка	41
0,11	отрыв доньшка	41	0,11	Превышение допустимых напряжений	51
0,1	отрыв доньшка	44	0,1		58

Анализируя данные представленные в таблице, можно сказать, что даже при уменьшении припуска на обрезку и коэффициента трения происходит превышение предельных напряжений.

Результат использования уменьшенного коэффициента трения в процессе штамповки детали из фигурной заготовки с размером $h=6,5$ мм также можно представить в виде таблицы:

Таблица 4. Результаты моделирования с фигурной заготовкой

h=6мм			h=6,5мм		
к-т трения	Результат	Глубина вытяжки без разрыва, мм	к-т трения	Результат	Глубина вытяжки без разрыва, мм
0,13	Превышение допустимых напряжений	46	0,13	Отрыв доньшка	41
0,11	Недостаток металла во фланце	60	0,11	Превышение допустимых напряжений	54
0,1	-	-	0,1	Полная вытяжка	60

По итогам исследований можно сказать, что при уменьшении коэффициента трения на рабочих поверхностях матрицы и пуансона удалось получить деталь с оптимальными геометрическими параметрами из фигурной заготовки. Но при этом стоит отметить, что в процессе штамповки также происходит появление значительных областей, в которых образуются достаточно глубокие складки ($(0,1 - 0,22)S$, см. рис. 9).

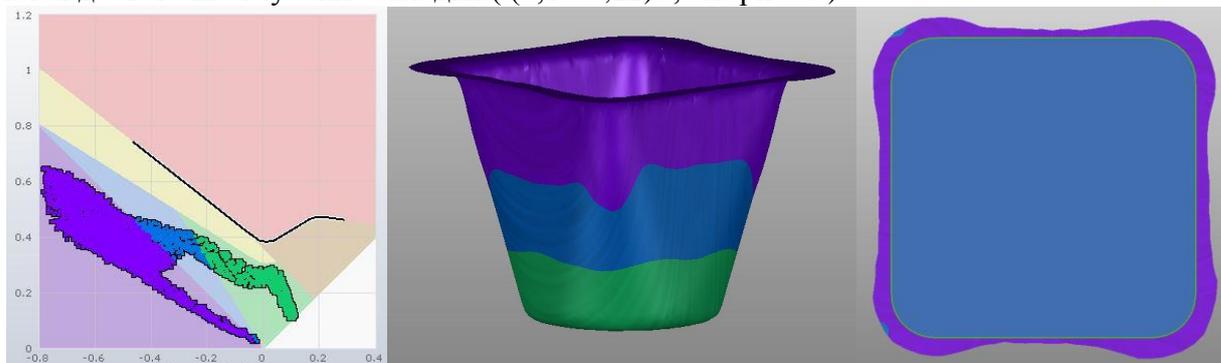


Рис. 20. Результат вытяжки из фигурной заготовки ($h=6,5$ мм)

Расположение зон образования складок и значения их высоты хорошо видно на рис. 21:

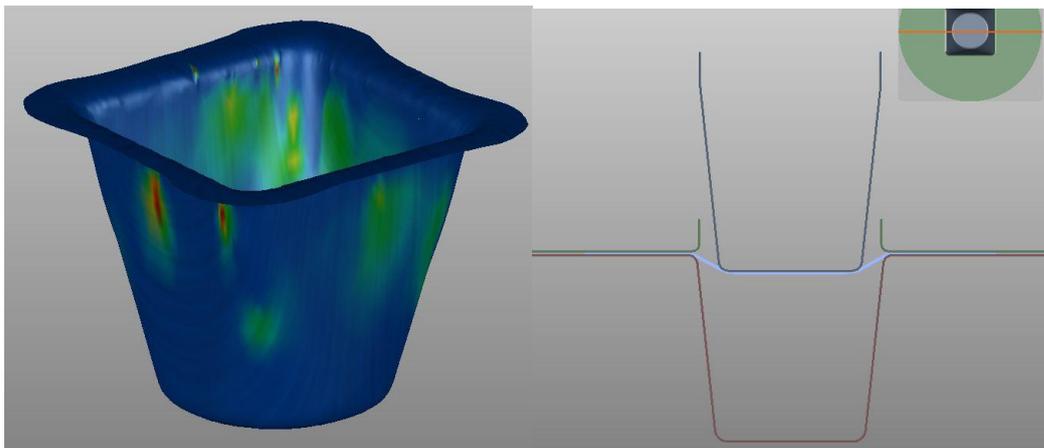


Рис. 21. Складкообразование Рис. 22. Конструкция оснастки (сечение)

Появление складок во время штамповки крайне нежелательно, так как этот дефект является практически неисправимым браком. Причинами складкообразования являются особенности течения металла и напряженно-деформированное состояние.

В рассматриваемом техпроцессе для препятствия образования гофр на фланце под действием сжимающих тангенциальных напряжений применяется прижим. Из-за конструкции используемой оснастки в начальный момент деформирования значительная часть заготовки находится вне зоны действия прижима (Рис.22), и существует повышенная опасность появления складок и гофр. Для снижения вероятности их появления во фланце и на стенках готовой детали, было принято решение о использовании большего значения силы прижима для увеличения растягивающих радиальных напряжений, которые повысят устойчивость протекания процесса штамповки [1].

Результаты изменения силы прижима отслеживались по четырем контрольным точкам и представлены в табл. 5:

Таблица 5. Влияние силы прижима

№ Эксперимента	Сила прижима, кН	Высота складок в контрольных точках, мм			
		1	2	3	4
1	56,6	0,188	0,242	0,170	0,188
2	113,2	0,188	0,247	0,164	0,188
3	169,8	0,188	0,247	0,170	0,186

Расположение контрольных точек показаны на рис. 23:

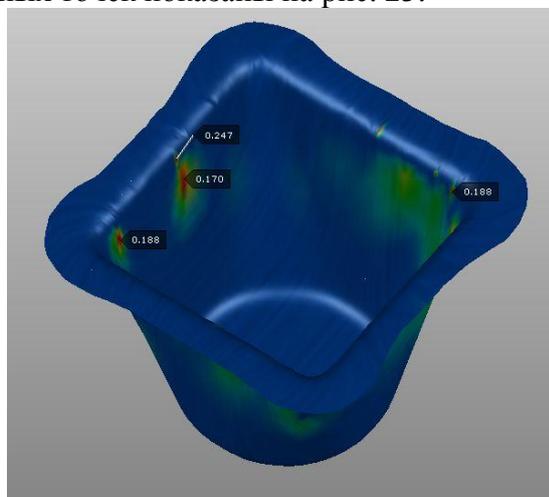


Рис. 23. Контрольные точки

Анализируя данные, представленные в табл. 5, можно сделать вывод, что высота складок и расположение зон их появления не зависит от силы прижима, но его отсутствие приводит к

интенсивному образованию гофр в начальный момент штамповки. Складки во фланце, за исключением небольших включений в области сопряжения с наклонными стенками, отсутствуют. Следовательно, можно предположить, что складки образуются в зонах, которые лежат вне прижима в начальный момент деформирования.

Другим способом борьбы со складкообразованием с помощью создания растягивающих напряжений является применение вытяжных ребер, располагающихся напротив прямолинейных участков детали [1]. Основными параметрами их геометрии являются высота ребра h , расстояние между ребрами A , радиус ребра R , радиус скругления на ответной части r :

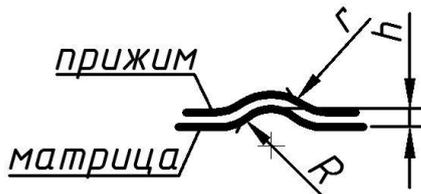


Рис. 24. Эскиз ребра

Исходные значения основных параметров: $h=1,5$ мм, $A=115$ мм, $R=3$ мм, $r=2$ мм.

Предполагалось, что использование вытяжных ребер позволит стабилизировать процесс деформирования металла, но при их применении наблюдалось чрезмерное препятствование течению металла в процессе штамповки. Это привело к изменению характера деформирования в донной зоне детали: вытяжка фактически перешла в процесс формовки, о чем свидетельствуют интенсивная деформация и значительное утонение доньшка и стенки (см. рис.25). Но при увеличении радиуса скругления r течение металла происходит в более благоприятных условиях, и процесс деформирования возвращается к вытяжке с зонами интенсивного утонения стенки у дна, само дно не деформируется (см. рис. 26):

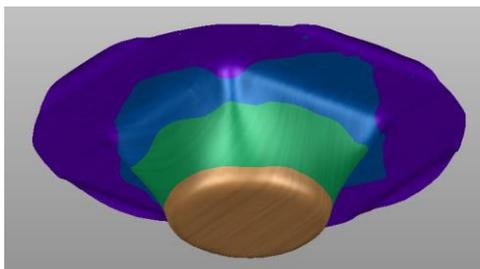


Рис. 25. При $r=2$ мм

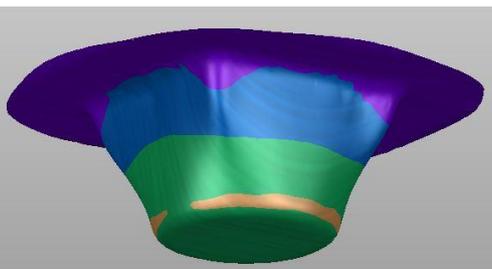


Рис. 26. При $r=4$ мм

При этом, при продолжении процесса штамповки и в том, и в другом случае происходит отрыв доньшка. Для того, чтобы исключить превышение предельных напряжений в опасном сечении, было принято решение о уменьшении высоты вытяжных ребер. Результаты приведены в табл. 6:

Таблица 6. Уменьшение высоты ребра

Высота ребра, мм	A=115 мм	
	Результат	Глубина вытяжки без разрыва, мм
1,5	отрыв дна	34
1,0	отрыв дна	42
0,5	Превышение предельных напряжений	50
0,3	Полная вытяжка	60

Из результатов, представленных в табл. 6 видно, что удалось получить деталь с приемлемыми геометрическими параметрами и исключить разрыв, о чем говорит диаграмма

пределных напряжений (см. рис. 27). Негативным результатом применения ребер меньшей высоты можно считать образование значительных областей появления складок (см. рис. 28):

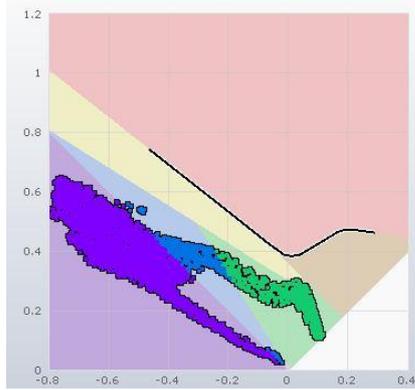


Рис. 27. Диаграмма предельных напряжений

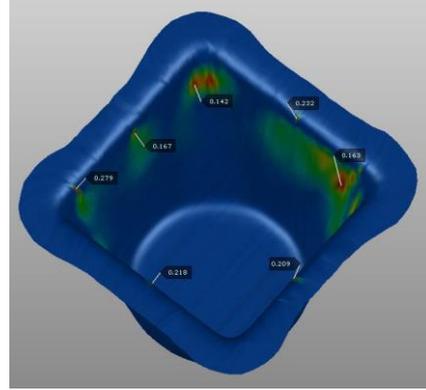


Рис. 28. Складкообразование

Можно предположить, что образование складок происходит из-за малого отрезка времени действия вытяжных ребер. С целью его увеличения на начальном этапе деформирования, было принято решение уменьшить расстояние между ребрами А до 110 мм, затем до 85 мм. При данных геометрических параметрах полной вытяжки удалось добиться лишь при высоте ребер $h=0,3\text{мм}$ (в обоих случаях). Распределение областей складкообразования и значений высоты складок представлены на рис. 29 и рис. 30:

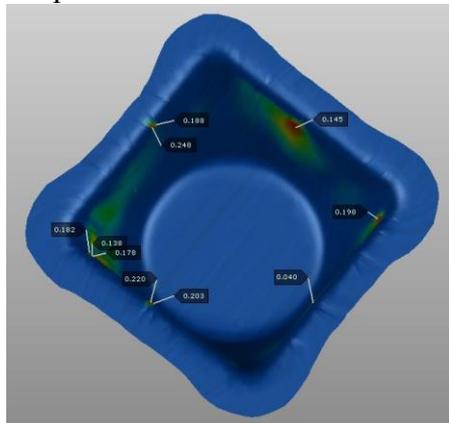


Рис. 29. При А=110мм

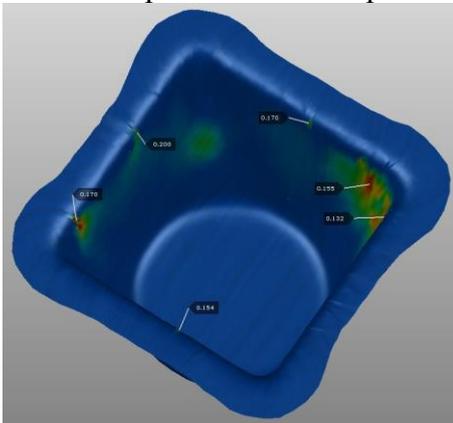


Рис. 30. При А=85мм.

Результаты необходимо сравнить с деталью, полученной без применения ребер:

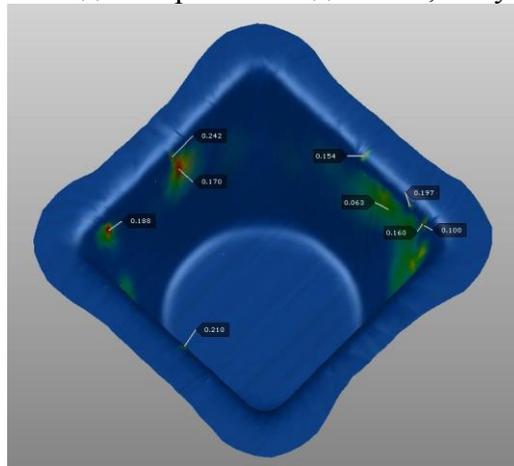


Рис. 31. Без вытяжных ребер

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что наилучший результат был достигнут при расстоянии между ребрами $A=85$ мм, при этом исключить образование складок не удалось, а уменьшение их высоты незначительно.

Выводы

В данной работе были рассмотрены различные технологические процессы штамповки детали типа "Патрубок".

Особое внимание уделялось таким вопросам, как характер течения металла в процессе деформирования, определение оптимальной геометрической формы заготовок для штамповки деталей такого типа, исследование влияния коэффициента трения на процесс вытяжки. Также были рассмотрены способы борьбы со складкообразованием: увеличение силы прижима и использование вытяжных ребер.

Анализируя полученные данные, стоит отметить, что при использовании оптимальной геометрической формы заготовки и уменьшенного коэффициента трения удалось получить деталь, близкую к необходимой: были обеспечены отсутствие разрыва, необходимые геометрические параметры (толщина стенки, глубина вытяжки, полнота формирования фланца с учетом припуска на обрезку). Но также можно сделать вывод о том, что диапазон изменения параметров, влияющих на возможность гарантированного исполнения технологического процесса очень узок, и даже малое изменение одного из них приводит к возникновению разрывов. Более того, даже при обеспечении необходимых геометрических параметров на данный момент не удалось исключить образование складок.

Учитывая проведенные исследования и сделанные выводы, более перспективным направлением является вытяжка за два перехода.

Литература

1. *Романовский, В.П.* Справочник по холодной штамповке /В.П. Романовский – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / Под общей редакцией *Л.И. Рудмана*. – М.: Машиностроение, 1988. – 496 с.

УДК 621.7.043

ВЫТЯЖКА ДЕТАЛЕЙ С НАКЛОННЫМ ФЛАНЦЕМ

Елена Александровна Рукавичко

Студент 4 курса

Кафедра «Технологии обработки давлением»

Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель: В.А.Кривошеин

Доцент кафедры «Технологии обработки давлением»

В работе рассмотрен процесс вытяжки детали типа «Крышка» с наклонным фланцем. Процесс вытяжки деталей такого типа не рассмотрен в литературе по обработке металлов давлением, нет рекомендаций по выбору формы исходной заготовки и предельном коэффициенте формоизменения. Поэтому исследование этого процесса представляет определенный научный интерес и имеет практическое применение в производстве. Чертеж детали представлен на Рис. 1.

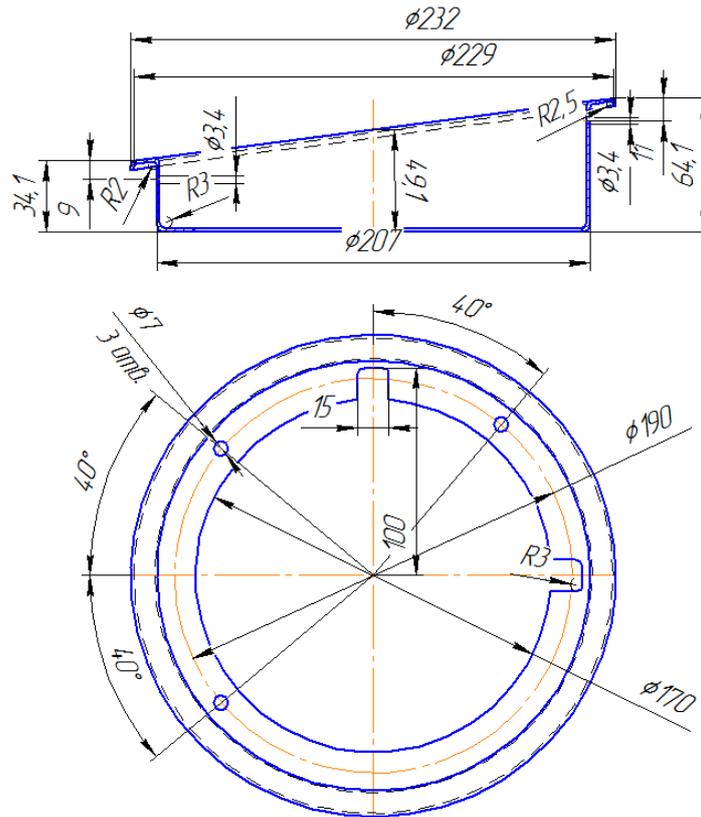


Рис. 18. Чертеж детали

Деталь типа крышка имеет нестандартную форму, поэтому для начала рассмотрим процесс вытяжки стаканчика с наклонным фланцем в программном комплексе Autoform. Торцевая часть пуансона имеет горизонтальную поверхность, при этом заготовка в начальный момент расположена под наклоном (рис. 2). Специфика процесса заключается в том, что очаг пластической деформации в виде дуги в начальный момент деформирования локализован с одной стороны и постепенно перетекает на всю кромку матрицы, образуя кольцо, и с этого момента идет типовой процесс вытяжки. На рис. 2 показан контакт пуансона с заготовкой при операции вытяжка для детали с наклонным фланцем.

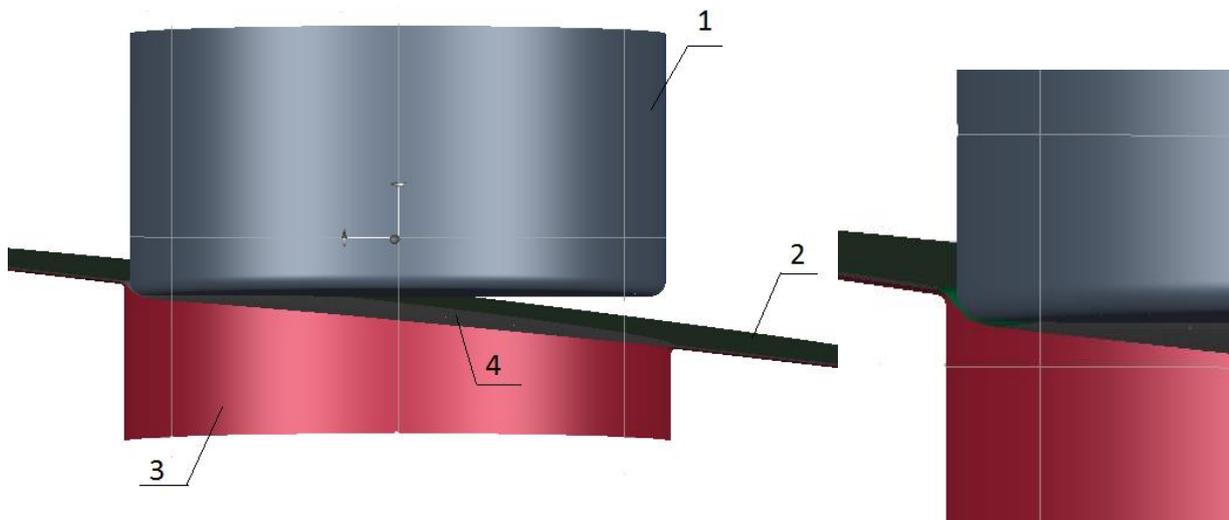


Рис. 19. Вход пуансона в заготовку с наклонным фланцем
(1-Пуансон, 2-Прижим фланца, 3-Матрица, 4-заготовка)

1. Выбор оптимальной формы исходной заготовки.

Так как деталь не симметричная, то круглую заготовку использовать не целесообразно, из-за большого отхода на обрезку со стороны наименьшей высоты детали. С помощью расчетов определим заготовку с наивысшим КИМ.

1). Рассмотрим круглую заготовку.

Определяем ее диаметр по наибольшей высоте $H=64,1$ мм

$$D = 1.13\sqrt{F} + 2\Delta H \approx 1.13 * \sqrt{83127,6} + 2 \cdot 4,6 \approx 335 \text{ мм} \quad (1)$$

Коэффициент использования материала:

$$\text{КИМ} = \frac{S_{\text{дет}}}{S_{\text{кр.заг.}}} * 100\% = \frac{50618}{114376} * 100\% = 44\% \quad (2)$$

2). Рассмотрим расчетную заготовку.

Для построения расчетной заготовки необходимо определить три значимые точки: а) с наименьшей высотой; б) со средней высотой; в) с наибольшей высотой стакана. Рассчитать диаметры заготовок для выбранных высот и задать функцию построения заготовки.

а). Наименьшая высота детали $H=34,1$ мм

$$D = 1.13\sqrt{F} + 2\Delta H \approx 1.13\sqrt{63968,7} + 2 \cdot 4,6 \approx 295 \text{ мм} \quad (3)$$

б). Средняя высота детали $H=49,1$ мм

$$D = 1.13\sqrt{F} + 2\Delta H \approx 1.13\sqrt{73234,9} + 2 \cdot 4,6 \approx 315 \text{ мм} \quad (4)$$

в). Наибольшая высота детали $H=64,1$ мм

$D_3 = 335$ мм

Находим функцию для построения контура заготовки:

$$D(x) = \frac{D_2}{2} + \left(\frac{D_3 - D_2}{2}\right) * \cos(x), \text{ где } x \in [0; \pi/2] \quad (5)$$

$$D(x) = \frac{D_2}{2} + \left(\frac{D_2 - D_1}{2}\right) * \cos(x), \text{ где } x \in [\pi/2; \pi] \quad (6)$$

$$D(x) = 157,5 + 10 * \cos(x), \text{ где } x \in [0; 2\pi] \quad (7)$$

Коэффициент использования материала:

$$\text{КИМ} = \frac{S_{\text{дет}}}{S_{\text{р.заг.}}} * 100\% = \frac{50618}{101248} * 100\% = 50\% \quad (8)$$

Расчет формы заготовки позволил увеличить КИМ на 6%, что является значительным показателем в условиях серийного производства. Функция Onestep программы Autoform предлагает свой вариант формы исходной заготовки с КИМ= 46%.

На рис. 3 представлены круглая, указана пунктиром, и расчетная заготовки. По результатам моделирования в программном комплексе Autoform можно отметить, что при вытяжке детали из круглой заготовки ширина фланца со стороны минимальной высоты стенки заготовки значительно больше (рис. 4, а) и в дальнейшем этот материал при операции обрезка идет в отход. При вытяжке же расчетной заготовки фланец имеет более равномерную величину по всему контуру (рис. 4, б).

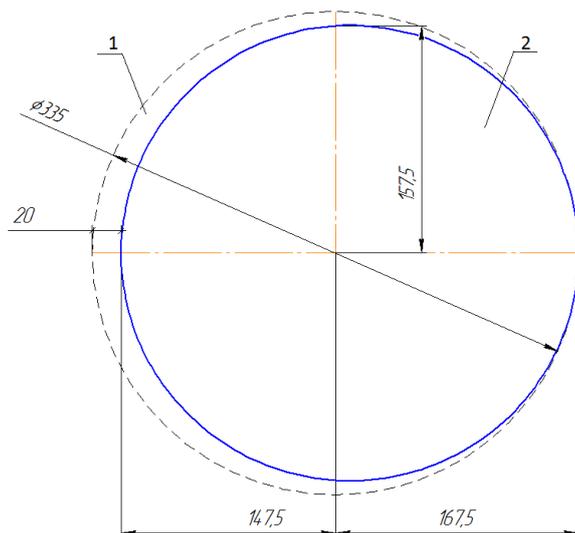


Рис. 3. Расчетная и круглая заготовки (1-круглая заготовка, 2-расчетная заготовка)

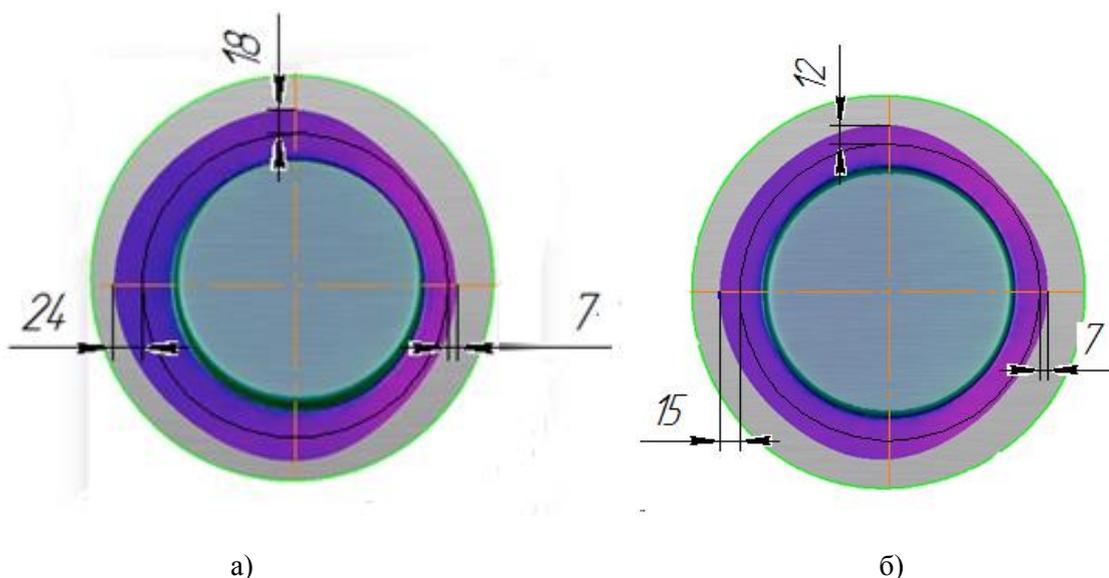


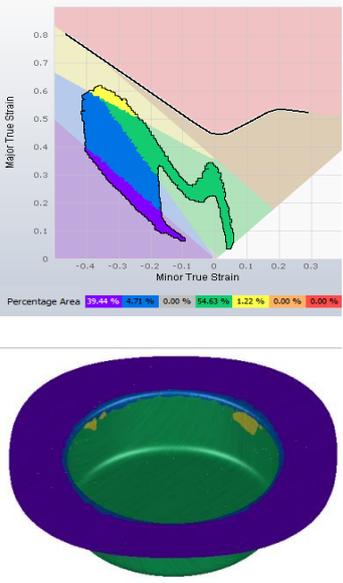
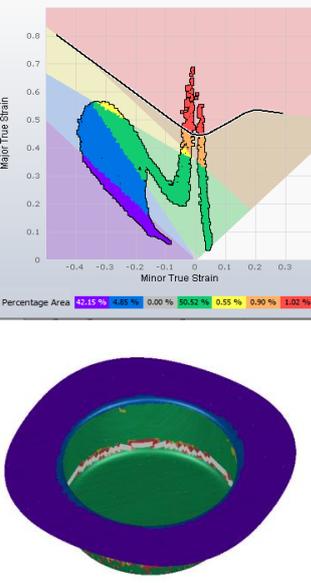
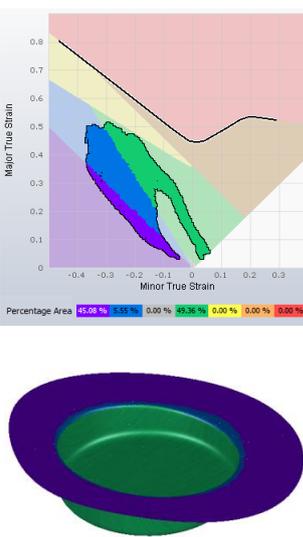
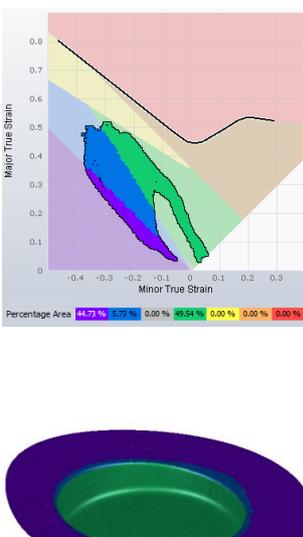
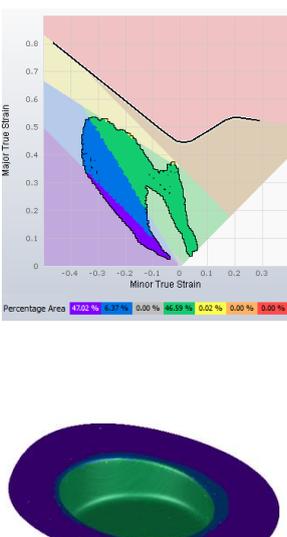
Рис. 4. Контур детали, полученный при моделировании (а) круглой и (б) расчетной заготовки

2. Сравнение предельных коэффициентов для вытяжек деталей с наклонным и плоским фланцами.

Так как деталь имеет наклонный фланец, и для нее в литературе нет данных по предельному коэффициенту вытяжки, то возникает необходимость нахождения его величины и сравнение его с предельным коэффициентом вытяжки детали с плоским фланцем.

В программном комплексе Autoform было проведено моделирование нескольких вариантов вытяжки детали с наклонным и плоским фланцем. В Таблице 1 приведены FLD-диаграммы и поля штампуемости деталей, для различных коэффициентов вытяжки. Заготовки для данного исследования выбираются круглой формой.

Таблица 1. Варианты вытяжки детали с наклонным и плоским фланцами

m	0,54	0,536	0,517	0,513
Плоский фланец	<p>Вход в зону риска</p> 	<p>Разрушение</p> 	<p>-</p> 	<p>-</p> 
	Наклонный фланец	<p>Без разрушения</p> 	<p>Без разрушения</p> 	<p>Без разрушения</p> 

Как видно по Таблице 1 на FLD- диаграмме для $m=0,54$ (предельный коэффициент по [2]) при вытяжке детали с плоским фланцем возникает вероятность разрушения. При уменьшении коэффициента вытяжки до $m=0,536$ в детали происходит отрыв дна, а у детали с наклонным фланцем при этом коэффициенте процесс вытяжки протекает без разрушения. Промоделировав еще несколько вариантов, определяем предельный коэффициент вытяжки для детали с наклонным фланцем, который составляет $m=0,513$. В итоге, за счет локализации очага

пластических деформаций, предельный коэффициент вытяжки для деталей с наклонным фланцем меньше на 4%.

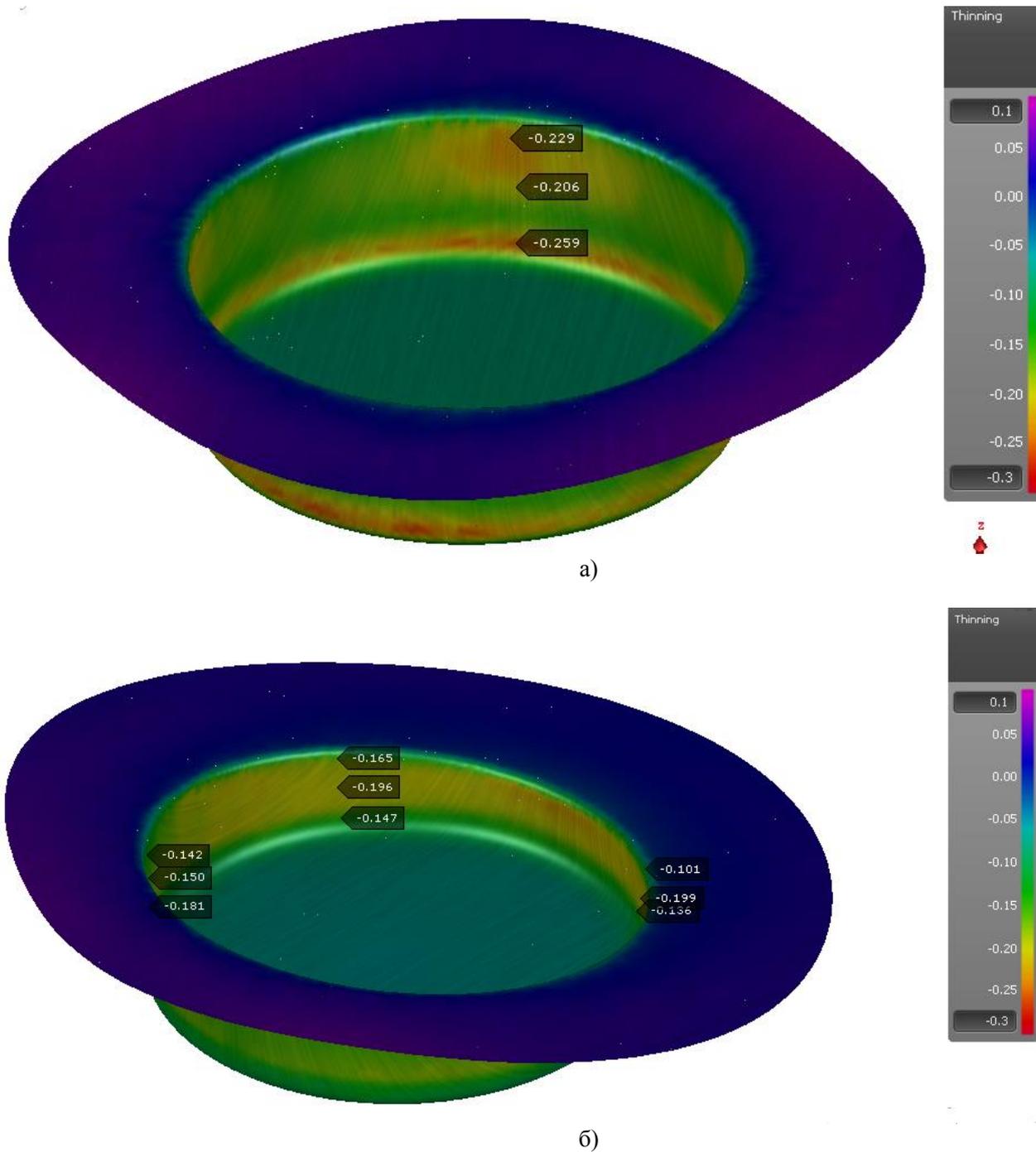


Рис. 5. Утонение при вытяжке детали (а) с плоским и (б) наклонным фланцем

Полученные результаты можно объяснить тем, что в начальный момент деформации происходит процесс формовки, и материал утоняется. При деформации детали с плоским фланцем происходит контакт заготовки с пуансоном по всей поверхности одновременно, а при деформации с наклонным фланцем пуансон деформирует заготовку постепенно (рис. 2,а). И как видно на рис. 5,а,б утонение в цилиндрической части стаканчика, в случае детали с плоским фланцем больше. Толщина детали напрямую влияет на ее прочность, поэтому для детали с

плоским фланцем, где утонение больше на 29%, предельный коэффициент вытяжки выше и отрыв дна происходит ранее, чем для вытяжки детали с наклонным фланцем. Так же напряжения в цилиндрической части стакана у детали с наклонным фланцем меньше на 10% (рис. 6,а, б), вследствие чего утонение меньше, и разрушение происходит позже, чем у детали с плоским фланцем.

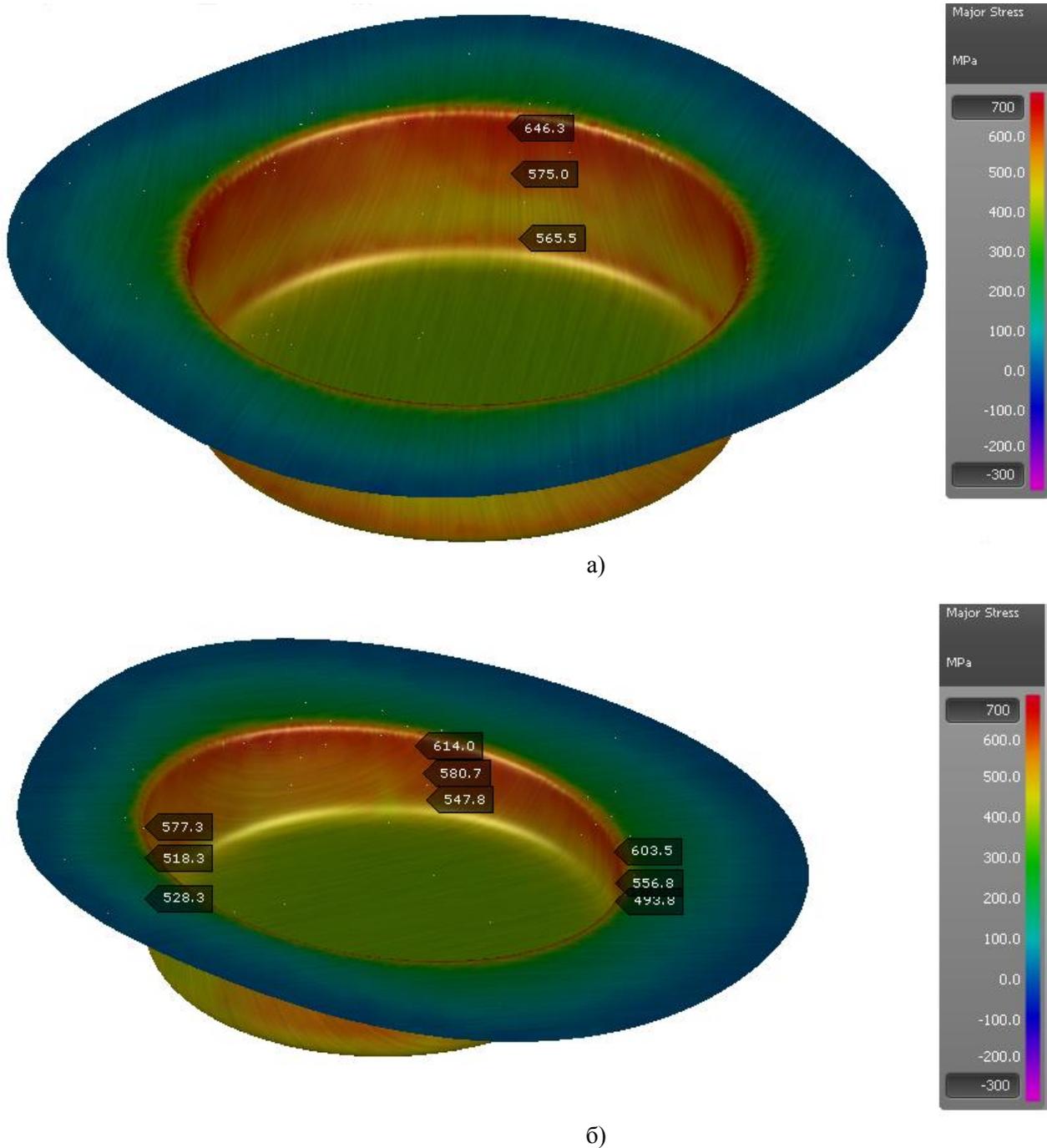


Рис. 6. Напряжения при вытяжке детали (а) с плоским и (б) наклонным фланцем

3. Проектирование штампа совмещенного действия вытяжка-пробивка.

Для изготовления данной детали используем многопозиционный листоштамповочный пресс-автомат, так как производство массовое и количество операций 6. Необходимая сила

деформирования $P=1700$ кН, поэтому выбираем пресс-автомат АБ6136. Так как деталь с наклонным фланцем для правильного позиционирования заготовки был спроектирован следующий штамп совмещенного действия вытяжка-пробивка (рис. 7). Штамп с нижним расположением пробивных матриц 6 и вытяжного пуансона 1 и верхним расположением пуансонов пробивки 11 и матрицы вытяжки 2. Заготовка укладывается на прижим-съемник 8 и при опускании верхней плиты штампа фиксируется клиновым фиксатором 17, закрепленный на матрицедержателе 3. При ходе ползуна пресса вниз пуансон вытяжки 1 вытягивает «Стаканчик». В конце операции вытяжка, при опускании верхней плиты 19 пробивные пуансоны выполняет пробивку отверстий. Прижим фланца заготовки в процессе вытяжки производят прижимом-съемником 8. Удаление детали после штамповки из вытяжной матрицы осуществляется с помощью прижима дна-выталкивателя 4 со встроенными в нем отливателями и толкателя 5. Для удаления детали с пуансона вытяжки служит прижим-съемник посредством толкателей 13. Шпонка 45 предназначена для фиксирования прижима-съемника. Упор 16 предназначен для ограничения хода прижима дна.

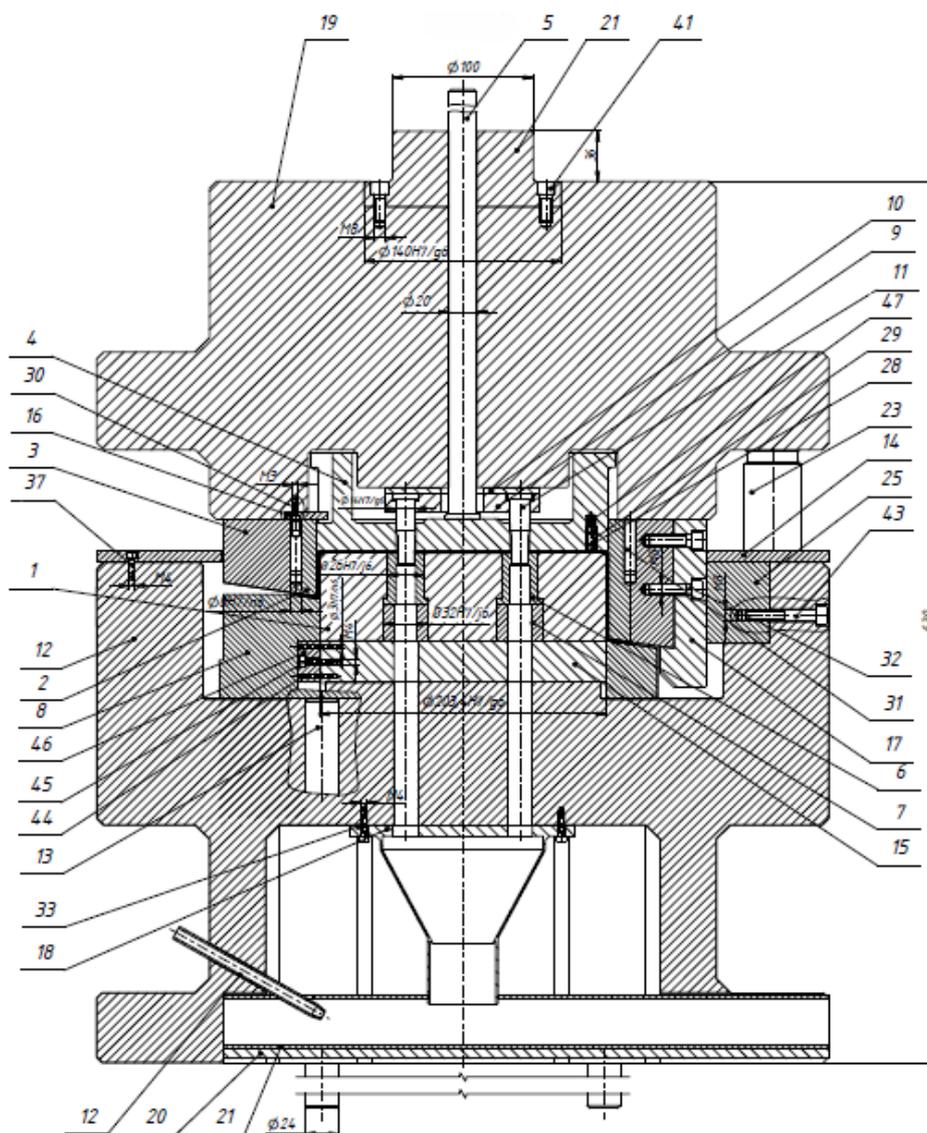


Рис. 7. Штамп совмещенного действия вытяжка-пробивка

Выводы:

При вытяжке деталей с наклонным фланцем можно повысить коэффициент использования материала путем расчета формы заготовки. КИМ для расчетной заготовки составляет 50%, а для круглой заготовки 44%.

Вытяжка с наклонным фланцем позволяет увеличить степень формоизменения за счет локализации очага пластической деформации на начальном этапе деформирования. Для рассмотренной детали с наклонным фланцем предельный коэффициент вытяжки составил $m=0,513$, с плоским $m=0,536$.

Анализ литературных источников показал, что схема вытяжки с наклонным фланцем не рассматривается как возможность интенсификации процесса листовой штамповки [4]. По типам интенсификации данную схему можно отнести к интенсификации по форме инструмента, представленной также в работе [5].

Литература

1. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка/Под общ. ред. Л. И. Рудмана. – М.: Машиностроение, 1988. – 496 с.: ил. – (Б-ка конструктора).
2. Справочник по холодной штамповке/Под общ. ред. Романовский В.П. М.: Издательство «Машиностроение» 1979г.
3. Технология и автоматизация листовой штамповки: Учебник для вузов/ Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин, М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 480с., ил.
4. Ершов В.И, Глазков В.И, Каширин М.Ф. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. – М. : Машиностроение, 1990. – 312 с.
5. Кривошеин В.А. Интенсификация процесса обжима посредством выбора геометрии поверхности контакта заготовки с матрицей // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 6. – С. 15–18.

УДК 621.771.63**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ-ВЫПРЯМЛЕНИЯ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК**

Денис Олегович Шихов⁽¹⁾, Максим Иванович Шулятьев⁽²⁾

Магистр 2 года⁽¹⁾, Аспирант 3 года⁽²⁾

*кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением и сварочное производство»
Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова*

Научный руководитель: Н.В. Тепин

кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением и сварочное производство»

Для получения упрочненных листовых заготовок применяется способ повторяющегося рифления-распрямления. Данный способ характеризуется высокой производительностью, отсутствием ограничений по длине заготовки, простотой используемого оборудования и возможностью встраивания в технологические процессы.

Известна схема процесса упрочнения длинномерных заготовок (рис. 1), в которой заготовка подвергается последовательно поперечной и продольной формовке с последующим выпрямлением в гладких валках без изменения размеров заготовки.

Для обеспечения равномерного упрочнения стоит задача определения оптимальных геометрических параметров инструмента. При деформации в валках-шестернях радиальный

зазор в зацеплении переменный, что может привести к обжатию заготовки по толщине. Также для обеспечения равномерного упрочнения необходимо деформировать заготовку по всей поверхности. Кроме того, необходимо решать задачу устойчивого захвата формованной полосы с гладкими валками.

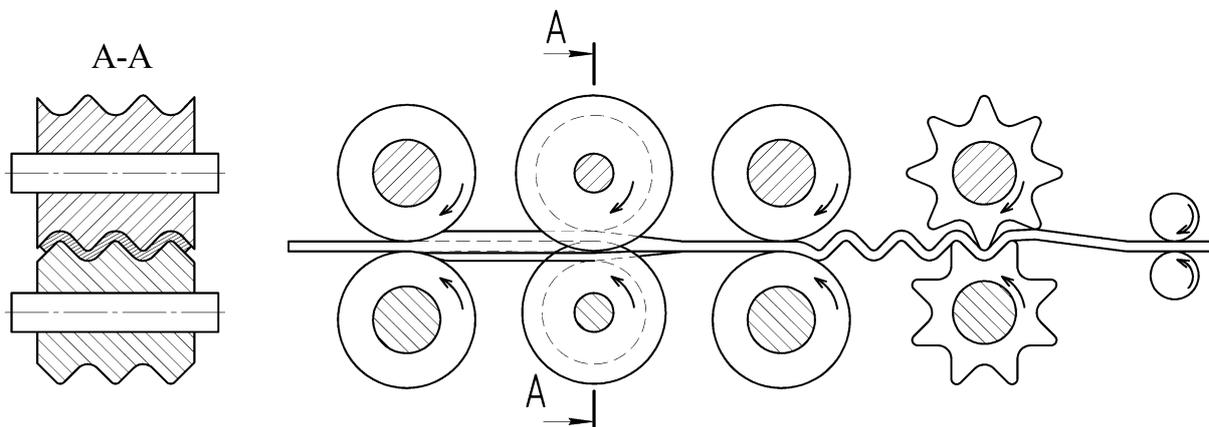


Рис. 1. Схема процесса деформационного упрочнения листовой заготовки [1]

Как показало моделирование процесса, использование в качестве профиля зуба обычного эвольвентного профиля (рис.2) не пригодно для необходимых условий деформирования[2]. Поскольку зубья впечатываются в исходную заготовку, что приводит к её деформированию по толщине и в дальнейшем может привести к её разрушению.

Для более качественного и эффективного осуществления процесса должны выполняться условия равномерного распределения упрочненных деформацией участков по всей площади поперечного сечения заготовки и минимальной деформации по толщине.

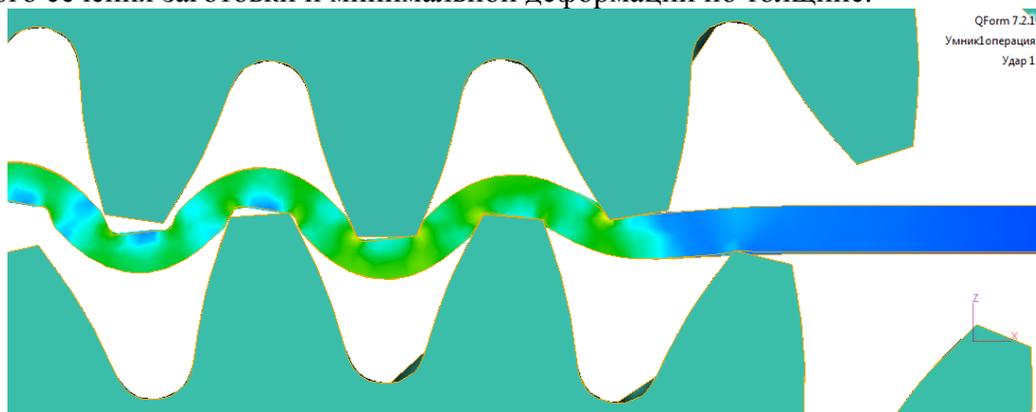


Рис. 2. Моделирование поперечной формовки.

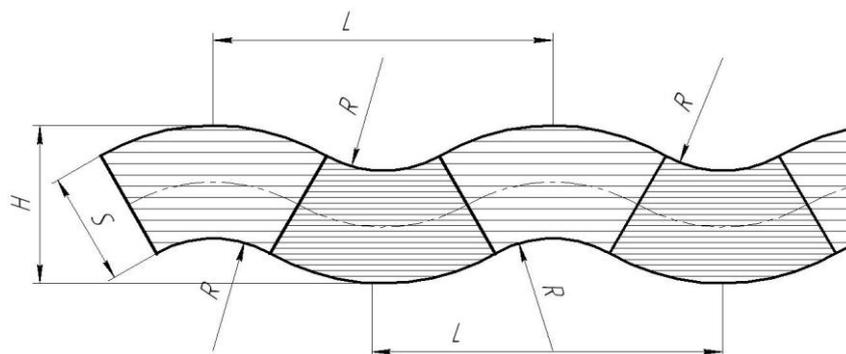


Рис. 3. Форма деформированной заготовки

В работе принимаем допущение, что напряжения распределяются на радиусных участках заготовки. Поэтому наиболее благоприятной является форма близкая к синусоиде

высотой $1,3S < H < 1,5S$ (рис.3). Такая конфигурация позволит обеспечить захват заготовки гладкими валками.

Программный комплекс QForm7.2 предоставляет возможность визуализировать процесс деформирования. Что, в свою очередь, можно использовать для проведения анализа процесса получения упрочненной длинномерной листовой заготовки.

QForm7.2 позволяет моделировать траекторию движения инструмента, произвести оценку кривизны заготовки в процессе изгиба, величину и распределение полей напряжений и деформаций по сечению, а также предсказать возможное утонение до критической величины и разрушение заготовки в процессе формоизменения.

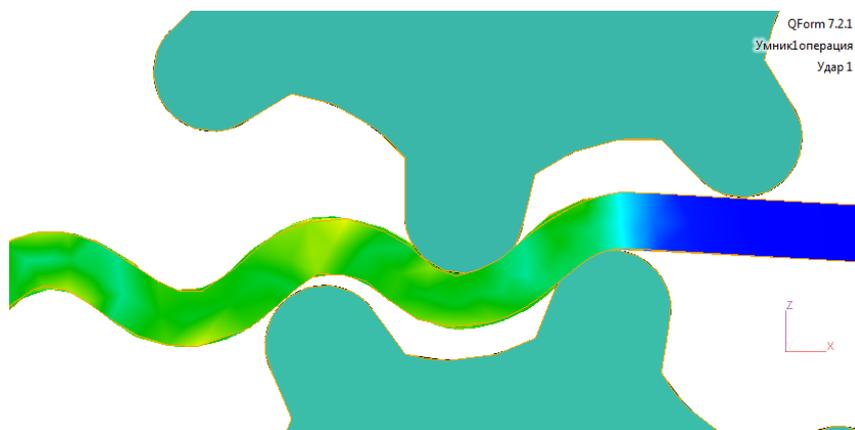


Рис. 4. Моделирование поперечной формовки

Для выявления наиболее подходящей конфигурации деформирующего инструмента проанализируем несколько возможных вариантов его исполнения. В качестве материала исходной заготовки примем сталь 20 для холодного деформирования из библиотеки материалов программы QForm7.2.

Моделирование процесса формоизменения в валках-шестернях, имеющих крупные зубья специальной конфигурации с радиусом закругления вершин $R=0,8S$ и высотой $h=1,6S$ (рис.4) показало, что высота гофр получаются больше $1,5S$. Величина напряжений в заготовке в местах изгиба достигает величины 130 МПа.

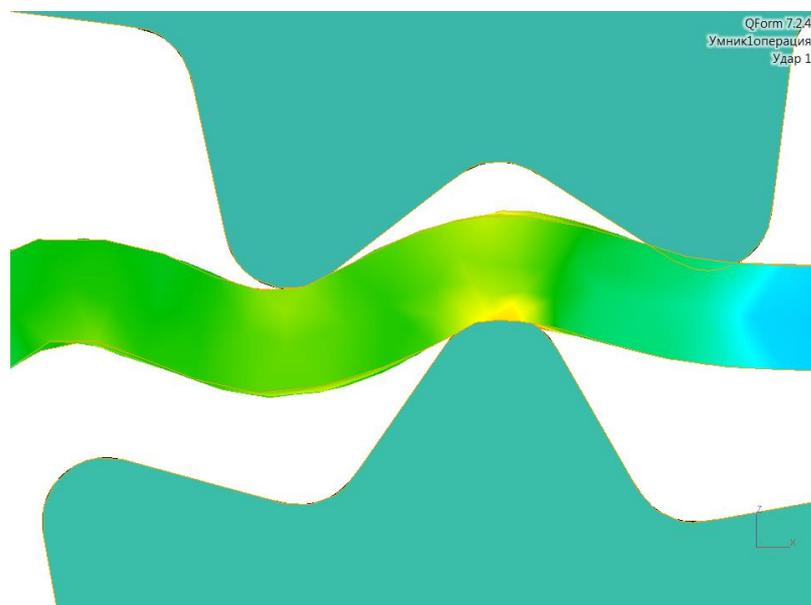


Рис. 5. Моделирование поперечной формовки

Моделирование процесса формоизменения в валках-шестернях, имеющих крупные зубья треугольной конфигурации с радиусом закругления вершин $R=0,6S$ и высотой $h=1,6S$ (рис.5) показало, что высота гофр уменьшилась до $1,3S$. Величина напряжений в заготовке в местах изгиба достигает величины 100 МПа .

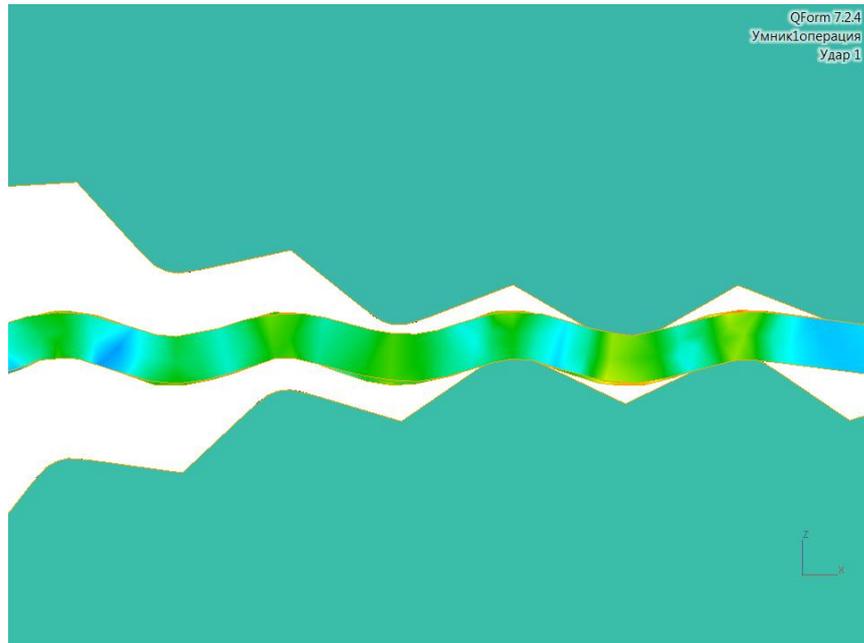


Рис. 6. Моделирование поперечной формовки

Моделирование процесса формоизменения в валках-шестернях, имеющих мелкие зубья треугольной конфигурации с радиусом закругления вершин зубьев $R=S$ и высотой $h=1,3S$ (рис.6) показало, что высота гофр уменьшились до $1,2S$. Величина напряжений в заготовке в местах изгиба достигает величины 95 МПа .

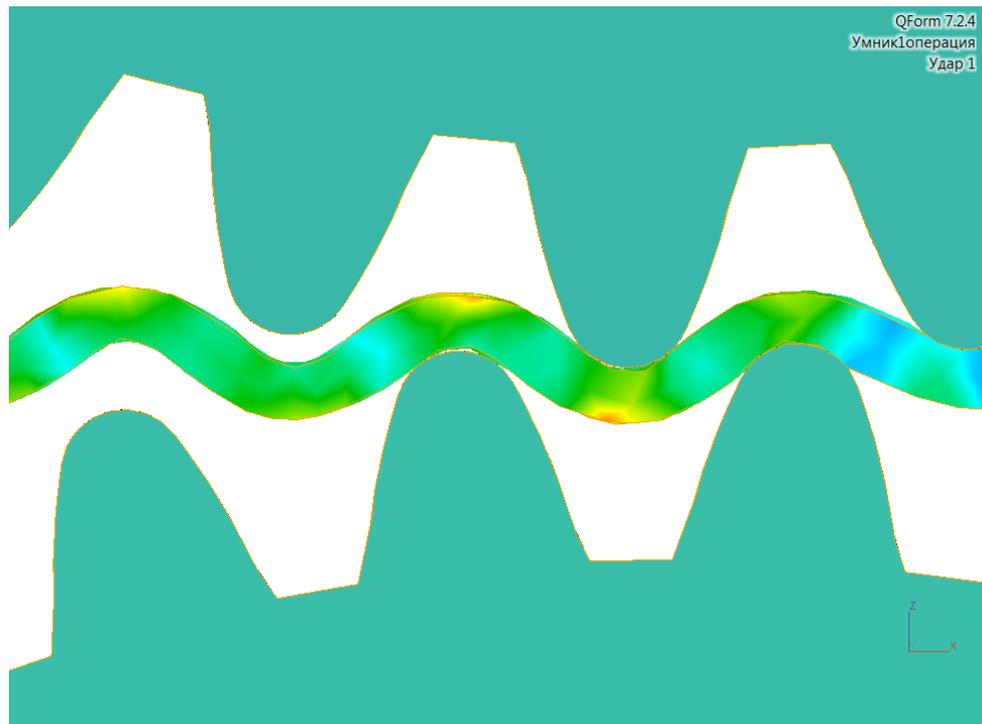


Рис. 7. Моделирование поперечной формовки

Моделирование процесса формоизменения в валках-шестернях, имеющих эвольвентный профиль с радиусом закругления вершин зубьев $R=S$ и высотой $h=3,4S$ (рис.7) показало, что высота гофр приближена к принятому значению $1,5S$. Величина напряжений в заготовке в местах изгиба достигает величины 190МПа.

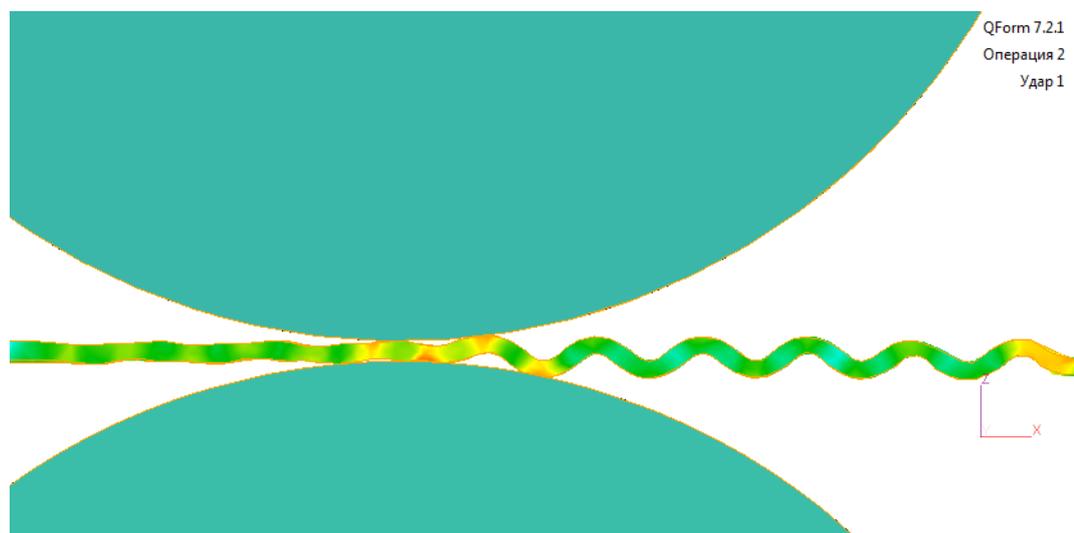


Рис. 8. Моделирование выпрямления заготовки

Моделирование процесса выпрямления (рис.8) показывает, что формованная в виде синусоиды заготовка хорошо захватывается гладкими валками и выпрямляется. На полученной выпрямленной заготовке наблюдается чередование зон в виде поперечных полос с малой и более высокой интенсивностью напряжений, соответствующих местам изгиба. Их ширина и интервал зависят от шага гофр после поперечной формовки исходной заготовки.

По результатам компьютерного моделирования в программном продукте QForm7.2 процесса формовки-выпрямления листовой заготовки были выявлены основные параметры процесса деформирования: интенсивность напряжений, среднее напряжение, степень деформации.

Моделирование показало, что при рассмотренных выше формах инструмента достигается необходимая деформация листовой заготовки. При этом не происходит существенного утонения металла или разрушения листовой заготовки в процессе деформирования.

Для получения более полной картины распределения деформаций в объеме заготовки необходимо провести моделирование продольной деформации и испытание натурных образцов.

Работа выполнена в рамках гранта по программе «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 0008620).

Литература

1. Заявка на изобретение (патент РФ) № 2014137693 от 17.09.2014г. Способ получения упрочненных листовых заготовок/ Панкратов Д.Л., Шеногин В.П., Тепин Н.В., Шулятьев М.И.
2. Получение длинномерных высокопрочных заготовок / М.И. Шулятьев, В.П. Шеногин, Н.В. Тепин // Всероссийская научно-практическая конференция "Инновации в науке, технике и технологиях" 28-30 апреля 2014: сборник статей. - Ижевск, Изд-во "Удмуртский университет", 2014. - 320 с. -С. 295-296.

Секция VIII

Материаловедение в машиностроении

Председатель:

Плохих Андрей Иванович

заместитель заведующего кафедрой МТ-8, кандидат
технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»
(МТ-8)

Ученый секретарь:

Шевченко Светлана Юрьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-8

УДК 621.791.92

ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ПОРОШКОВ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА И НИКЕЛЯ

Анастасия Андреевна Александрова

*Студент 4 курса**кафедра «Материаловедение»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: К.О. Базалева**кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материаловедение»***Введение**

В настоящее время лазерная наплавка является перспективным методом восстановления изношенных деталей, создания защитных покрытий, кроме того, она может быть использована для прототипирования трехмерных деталей. Процесс основан на синхронной коаксиальной подаче на поверхность детали тонкой струи порошкового материала и лазерного луча. Под действием лазерного луча происходит перекристаллизация подаваемого порошка, а также тонкого поверхностного слоя самой детали. Область воздействия лазера на обрабатываемую поверхность составляет доли миллиметра, однако лазер может сканировать поверхность детали, создавая, таким образом, из подаваемого порошка сплошное покрытие. Основными технологическими параметрами данного процесса являются мощность лазерного пучка, скорость сканирования лазера по поверхности детали, а также диаметр фокусирующего пятна на ее поверхности [1].

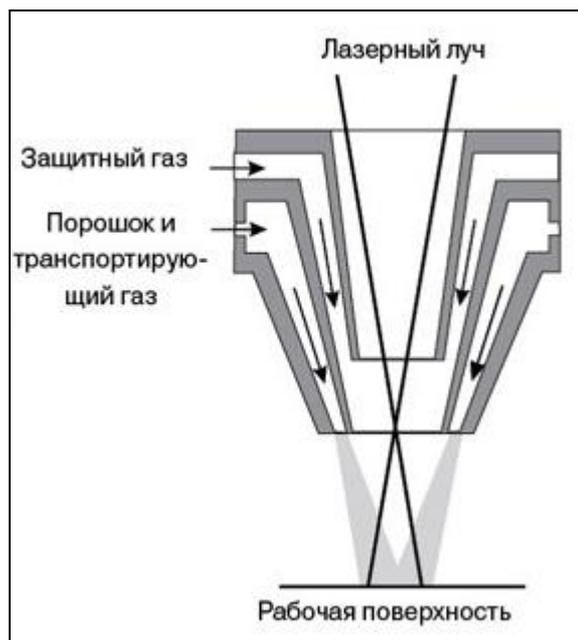


Рис. 1. Схема наплавки с коаксиальной подачей порошка.

Материал и методика

В данной работе исследовалась структура износостойких покрытий, полученных методом лазерной наплавки порошковых материалов на основе карбида вольфрама и никелевого самофлюсующегося сплава. Схема данного метода представлена на рисунке 1. Состав используемых для наплавки порошков приведен в таблице 1, их дисперсность

составляла $53 \div 106$ и $53 \div 150$ мкм, соответственно, и они были получены методом газовой атомизации. Также известно расчетное значение твердости порошка на никелевой основе, оно составляет 425 HV.

Таблица 1. Химический состав порошков

Порошок	Ni	Cr, %	Fe, %	B, %	Si, %
1560	База	7,5	2,5	1,6	3,5
Порошок	W	C, %	Co, %		
44712-10	База	5,5	12		

Покрывание наносилось на стальную подложку. Мощность лазера составляла 1500 Вт. Были исследованы три покрытия с различным соотношением в составе карбида вольфрама и никелевой матрицы.

Фазовый состав наплавленных покрытий исследовался методом рентгенодифракционного анализа на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker AXS в фильтрованном $\text{Co K}\alpha$ – излучении. Структура наплавленных слоев изучалась методом металлографического анализа; оценивалось распределение карбидных частиц по объему наплавленного слоя. Кроме того, определялись значения микротвердости по глубине наплавленного слоя. Измерения микротвердости проводились с нагрузкой 50 г, чтобы иметь возможность оценить твердость разных структурных составляющих. Погрешность измерения микротвердости составляла 5%.

Результаты исследования

На рисунке 2 и 3 представлены микроструктуры наплавленных слоев. Из рисунков видно, что в структуре сплава присутствуют темные частицы округлой формы с размытыми границами, практически равномерно распределенные по матрице, предположительно, карбиды вольфрама и более светлая матрица с дендритным строением, которая, предположительно, представляет собой никелевую основу. Трещины в структуре не наблюдаются, однако зафиксировано некоторое количество пор. При этом микроструктура трех разных образцов незначительно отличаются друг от друга, единственно, в третьем наплавленном слое на поверхности значительно больше частиц WC и меньше никелевой основы. Методом количественной металлографии было оценено количество карбида вольфрама в исследуемых образцах. Оно составило 65; 75 и 90% соответственно.

На рисунке 4 представлена дифрактограмма, полученная с наплавленного слоя, а в таблице 2 приводится идентификация линий данной дифрактограммы[4]. Дифрактограммы, полученные со всех исследованных образцов, имели подобный вид. Рентгенодифракционный фазовый анализ показал, что наиболее интенсивные линии дифрактограммы принадлежат фазе с гексагональной кристаллической решеткой WC, кроме того, в сплаве присутствуют никелевый твердый раствор с ГЦК решеткой, а также, предположительно, интерметаллидная фаза $(\text{Co,Fe})_7\text{W}_6$. Судя по интенсивности, количества никелевой фазы и интерметаллидного соединения в сплаве незначительное.

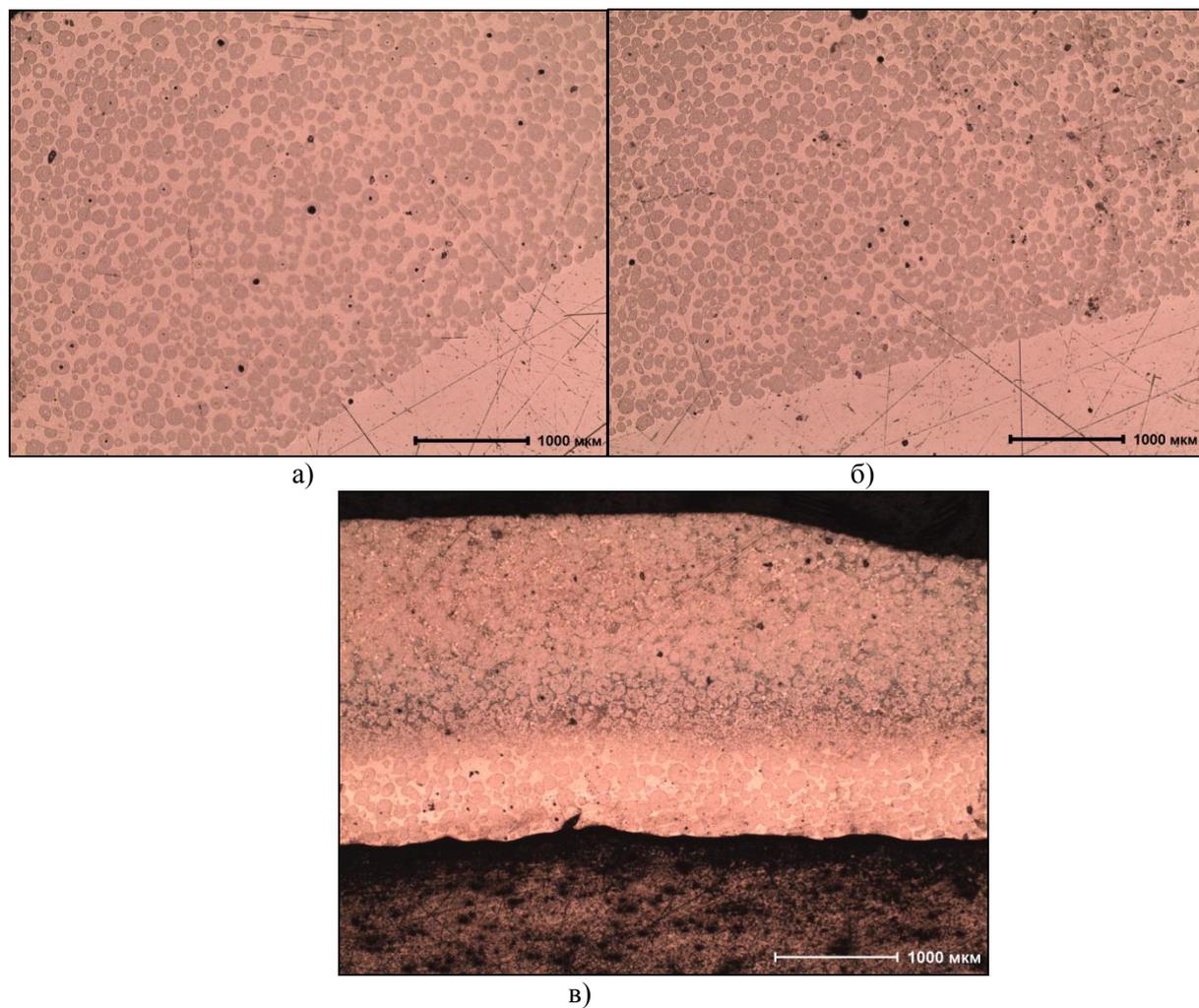


Рис. 2. Микроструктуры наплавленного покрытия с разным соотношением карбида вольфрама: а) 65% WC; б) 75%WC; в) 90%WC.

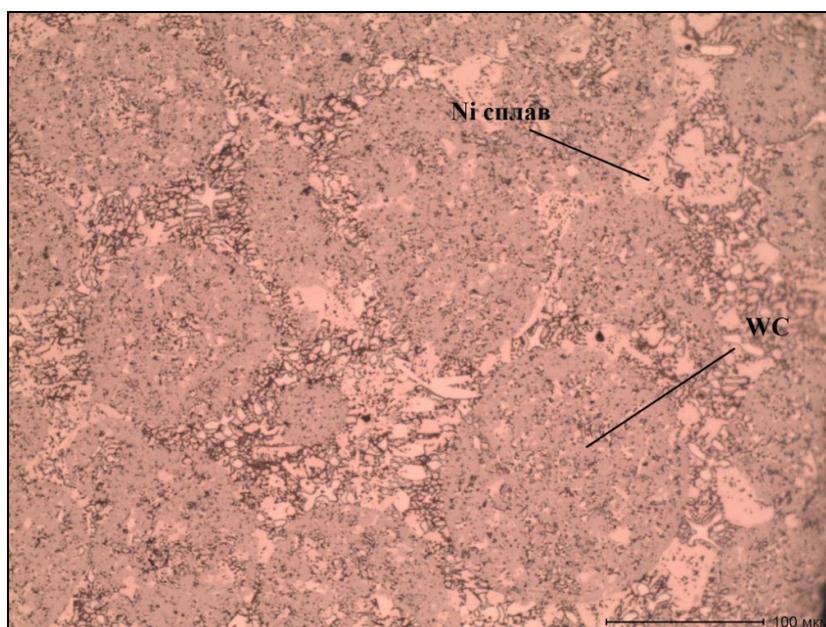


Рис. 3. Структура наплавленного покрытия.

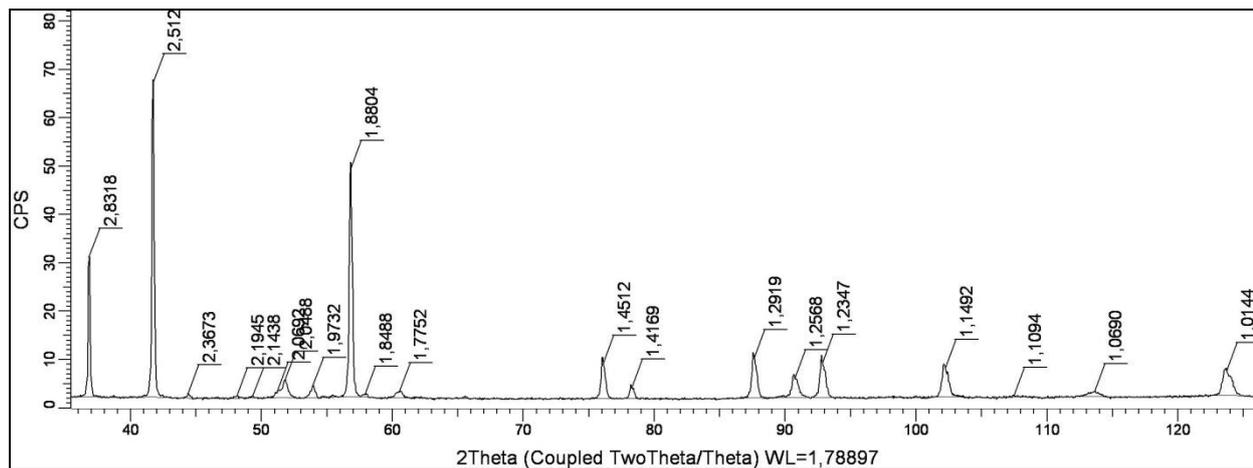


Рис. 4. Дифрактограмма наплавленного покрытия.

Таблица 2. Идентификация линий дифрактограммы

№	d, Å	I	hkl	Фаза
1	2,8318	5533	001	WC
2	2,5126	12433	100	WC
3	2,3673	190	110	(Co,Fe) ₇ W ₆
4	2,1945	72,2	343	(Co,Fe) ₇ W ₆
5	2,1438	73,4	444	(Co,Fe) ₇ W ₆
6	2,0692	270	312	(Co,Fe) ₇ W ₆
7	2,0488	692	111	Ni
8	1,9732	470	022	(Co,Fe) ₇ W ₆
9	1,8804	8990	101	WC
10	1,8488	88,7	243	(Co,Fe) ₇ W ₆
11	1,7752	245	200	Ni
12	1,4512	1361	110	WC
13	1,4169	426	002	WC
14	1,2919	1571	111	WC
15	1,2568	741	200	WC
16	1,2347	1362	102	WC
17	1,1492	1141	201	WC
18	1,0690	168	311	Ni
19	1,0144	964	112	WC

В работе отдельно определялось значение микротвердости карбидных частиц и отдельно микротвердость никелевой матрицы. Микротвердость карбидных частиц составляла примерно 1100 HV_{0.05}, и она одинакова во всех исследованных покрытиях и практически не изменяется по глубине наплавленного слоя. Значения микротвердости матрицы сильно возрастают по мере удаления от подложки. На рисунке 5 приведена зависимость микротвердости никелевой

матрицы от глубины наплавленного слоя. Из рисунка видно, что во всех исследованных покрытиях значение микротвердости никелевой матрицы в глубине наплавленного слоя около подложки составляет примерно $670 \div 750 \text{ HV}_{0.05}$, а на поверхности возрастает до $870 \div 900 \text{ HV}_{0.05}$. Такие высокие значения микротвердости никелевого твердого раствора указывают на его высокое пересыщение легирующими элементами. А увеличение значения микротвердости на поверхности наплавленного слоя, предположительно, связано с ростом пересыщенности никелевого твердого раствора примесными атомами: Cr, Fe, W и C.

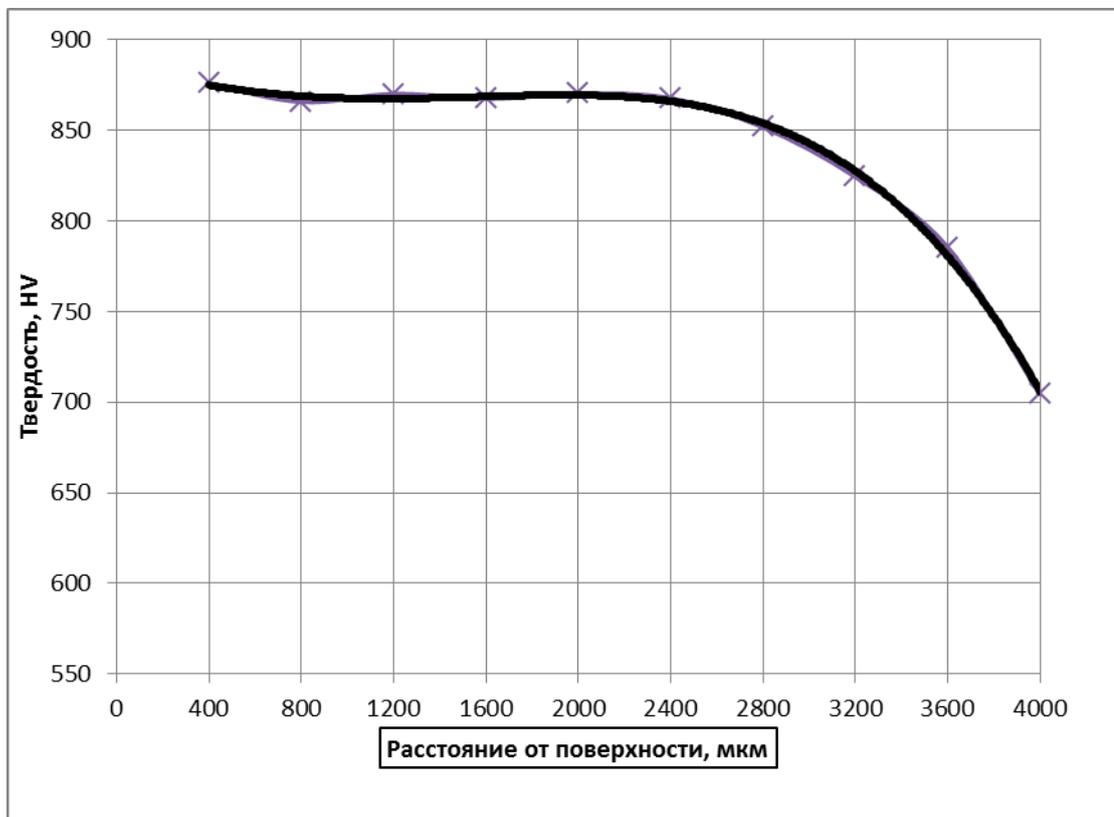


Рис. 5. Изменение микротвердости матрицы по глубине наплавленного слоя

Заключение

Исследована структура износостойкого покрытия, полученного методом лазерной наплавки. Показано что в структуре полученного покрытия присутствуют частицы гексагонального карбида WC, никелевый твердый раствор с ГЦК решеткой и интерметаллидная фаза $(\text{Co,Fe})_7\text{W}_6$.

Установлено, что при таком способе наплавки твердость покрытия составляет около 900 HV, что объясняется высокой концентрацией карбида и пересыщением никелевого твердого раствора.

Литература

1. Мисюров А.И., Федоров Б.М. Технология лазерной наплавки // М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
2. <http://www.mirprom.ru/public/metody-i-primeneniye-lazernoy-naplavki.html>
3. <http://www.mirprom.ru/public/lazernaya-naplavka-poverhnosti.html>

УДК 621.78**УСТАНОВКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ШАССИ САМОЛЕТА**Сергей Владимирович Беляков⁽¹⁾, Даниил Андреевич Иконников⁽²⁾*Магистрант 1 года⁽¹⁾, аспирант 1 года⁽²⁾**кафедра «Материаловедение»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: М.Ю. Семенов**кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»*

Конструкция шасси самолета включает в себя ряд деталей (гильзы и штоки гидравлических цилиндров, элементы стойки шасси и т.п.), основными условиями эксплуатации которых являются различные малоцикловые усталостные нагрузки, ударные и другие виды нагружений, а также условия резкого перепада температур окружающего воздуха.

Наиболее распространенным материалом, из которого изготавливаются указанные детали, является улучшаемая среднелегированная сталь 30ХГСА (химический состав – таблица 1), широко используемая в авиационной промышленности. В качестве заменителей данной стали применяются марки 40ХФА, 35ХМ, 40ХН, 25ХГСА, 35ХГСА [1].

Таблица 1. Химический состав стали 30ХГСА [2]

Концентрация легирующих элементов и примесей, %							
C	Si	Cr	Mn	S	P	Ni	Cu
0,28– 0,34	0,90– 1,20	3,00– 3,40	0,80– 1,10	≤0,025	≤0,025	≤0,30	≤0,30

Традиционным режимом термической обработки данной стали является закалка с температуры 888 °С в масло с последующим высоким отпуском при температуре 550-650 °С с охлаждением в воде или масле (ввиду чувствительности к после отпускной хрупкости). После высокого отпуска достигается достаточно высокая ударная вязкость KCU , равная 42-49 Дж/м² при температуре отпуска, равной 540 °С, и 54-59 Дж/м² – при 620-640 °С [2].

Высокая ударная вязкость данной стали стабильно сохраняется при пониженных температурах, при которых зачастую эксплуатируются указанные дела. Так после отпуска при температуре 580-620 °С достаточная ударная вязкость (более 40 Дж/м²) сохраняется при температурах вплоть до -40 °С.

Вместе с тем, после высокого отпуска твердость поверхности стали не превосходит 230-310 HV [2] (20-31 HRC [3]).

Такой низкий уровень твердости не обеспечивает необходимого сопротивления поверхностей деталей изнашиванию микрорезанием абразивными частицами, возможным при эксплуатации указанных деталей в характерных для них условиях.

Вместе с тем уменьшение температуры отпуска или проведение поверхностного упрочнения путем цементации недопустимо вследствие снижения ударной вязкости и повышения вероятности ударного разрушения, которое для деталей шасси может привести к катастрофическим последствиям.

Кроме того, как известно, повышение прочности поверхности способствует повышению выносливости при изгибе (в том числе, малоцикловом) за счет увеличения энергии зарождения усталостной трещины в области наибольших изгибных напряжений, то есть на поверхности.

Как показали предварительные испытания указанных деталей из стали 30ХГСА на изгибную выносливость, их долговечность находится в опасной зоне, близкой к минимальным

допустимым значениям. Таким образом, существующая технология упрочнения не в полной мере удовлетворяет требованиям надежности летательных аппаратов.

Также существенным образом на изгибную усталость поверхности влияет ее шероховатость. Так чем больше высота микронеровностей и меньше их шаг, тем меньше радиус закругления микроскопических впадин, что приводит к росту в этих местах концентрации напряжений и, как следствие, к снижению усталостной прочности [4].

Эффективным способом повышения твердости и снижения шероховатости поверхности является электромеханическая обработка (ЭМО), которая, в зависимости от плотности электрического тока, может приводить к нагреву поверхности выше температуры аустенитного превращения с последующей закалкой, так и к нагреву ниже порога рекристаллизации [5].

Электромеханическая обработка обеспечивает повышение твердости поверхности при сохранении вязкой сердцевины детали; отсутствие окисления и обезуглероживания поверхностного слоя; оптимальную микрогеометрию по высоте и форме [6].

Согласно данным [5], в результате ЭМО нормализованной стали 45 по различным режимам приводит к уменьшению значения параметра шероховатости R_z с 26-30 мкм до 2 мкм. При этом в среднем при ЭМО начальное и конечное значение параметра шероховатости различается в 2-5 раз. В работе [7] достигнута шероховатость стальной поверхности R_a , равная 0,2 мкм.

В связи с изложенным, целью настоящей работы явилось разработка оригинальной установки электромеханической обработки для поверхностного упрочнения и уменьшения шероховатости образцов из среднеуглеродистой стали а также ее экспериментальное опробование.

Экспериментальную установку ЭМО реализовали на базе токарного станка модели 16K20 (рис. 1), на котором обрабатывали наружную цилиндрическую поверхность образца. Образец (1) закрепляли в трехкулачковом патроне (2) станка. Обрабатывающий инструмент – обкатной ролик (3) закрепляли в специальной державке (4), которую устанавливали в резцедержателе (5) станка.

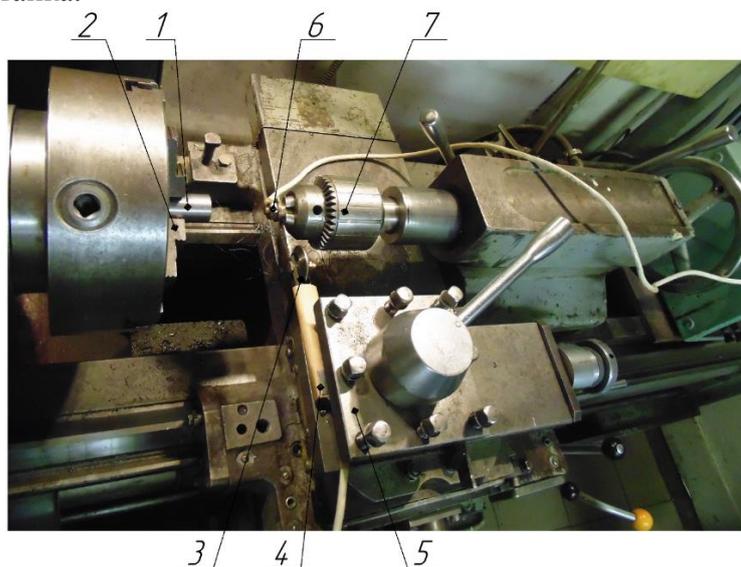


Рис. 1. Рабочая зона экспериментальной установки.

Принципиальная электрическая схема установки (рис. 2) предусматривает возможность подвода на заготовку низковольтного постоянного тока высокой плотности (напряжение 6 В), при этом сила тока регулировалась в пределах 100-300 А.

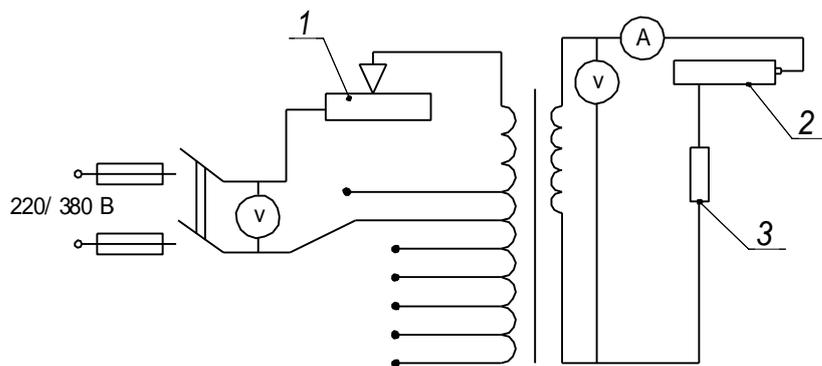


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки:

1 – реостат, 2 – заготовка, 3 – инструмент

Выпрямление тока из промышленной сети, а также контроль и измерение силы тока осуществлялись лабораторным регулируемым автотрансформатором типа РНО-250-2, сварочным трансформатором с выпрямителем и амперметром.

В качестве материала для исследуемого образца выбрали по аналогии с работой [5] среднеуглеродистую сталь 45 в состоянии поставки (химический состав – таблица 2).

Таблица 2. Химический состав стали 45 [2]

Массовая концентрация элементов, %									
C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu	As	N
0,42–0,50	0,17–0,37	0,50–0,80	≤0,25	≤0,040	≤0,035	≤0,30	≤0,30	≤0,08	≤0,008

Согласно [2] данная сталь имеет в состоянии поставки твердость, равную 197 *HB* (в отожженном состоянии) и 229 *HB* (в горячекатаном или нормализованном состоянии), т.е. порядка 18-20 *HRC*.

Образцы подвергали механической обработке: разрезали прут из стали 45 на части и обтачивали на диаметр 30 мм. Получили 40 цилиндрических образцов, которые условно в процессе обработки делили на 3 зоны (рис. 3): первая зона использовалась для контроля исходной твердости; вторая зона подвергалась обкатке роликом без подачи тока; третья зона подвергалась обкатке с подводом тока. В ходе обработки варьировали нормальную нагрузку на ролик *P* (в пределах от 100 до 800 Н); скорость подачи инструмента *v* (от 2 до 10 м/мин); силу тока *I* (в пределах, указанных выше).

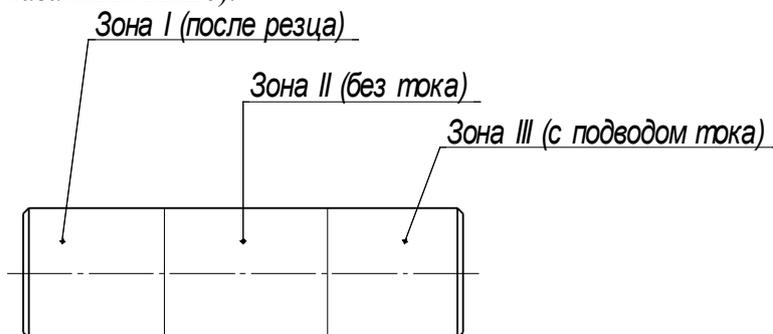


Рис. 3. Схема экспериментального образца

Контролировали твердость на твердоммере "Duravision 20/30" и шероховатость поверхности на профилометре "Taylor Hobson" (группа АМЕТЕК, Inc).

В результате получили увеличение твердости обработанной поверхности после обработки роликом без подачи тока в 1,5 раза; с подачей тока более чем в 2 раза по сравнению с исходной твердостью (рис. 4). Как показал анализ выборки, значения силы тока, скорости подачи и приложенной нагрузки в указанных пределах не оказали существенного влияния на

твердость образцов. Максимальная твердость была достигнута при проведении электромеханической обработки и составила 42 HRC.

Таким образом, в результате проведенной ЭМО нормализованной стали 45 достигли уровня твердости поверхности стали 30ХГСА после термического улучшения. В этой связи представляется целесообразным рассмотреть вопрос о целесообразности применения ЭМО к образцам из стали 30ХГСА после закалки и высокого отпуска, который решить в ходе дальнейших экспериментальных исследований на разработанной установке электромеханической обработки.

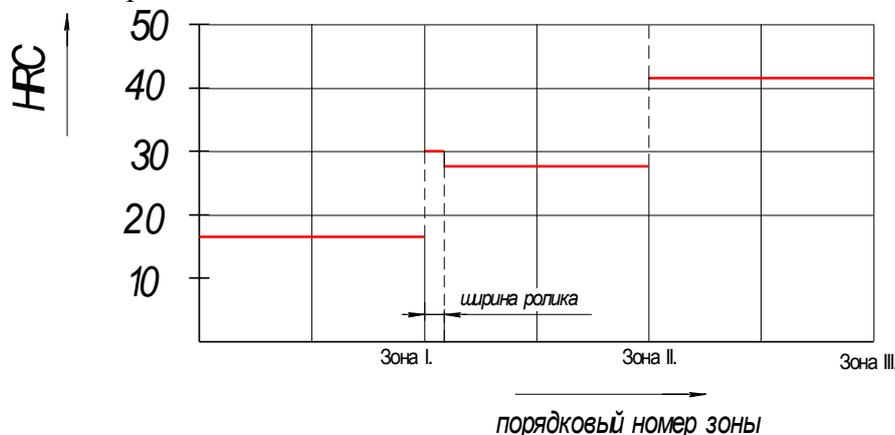


Рис. 4. Распределение твердости по зонам обработки образца (режим обработки: $v=4$ м/мин, $I=200$ А, $P=400$ Н)

В тоже время на результирующую шероховатость существенное влияние оказали режимы обработки.

Так минимальная шероховатость при обработке роликом без подачи тока составила несколько менее 1 мкм при приложенной нагрузке, равной 300 Н, и скорости обработки $v=4$ м/мин (рис. 5 и 6).

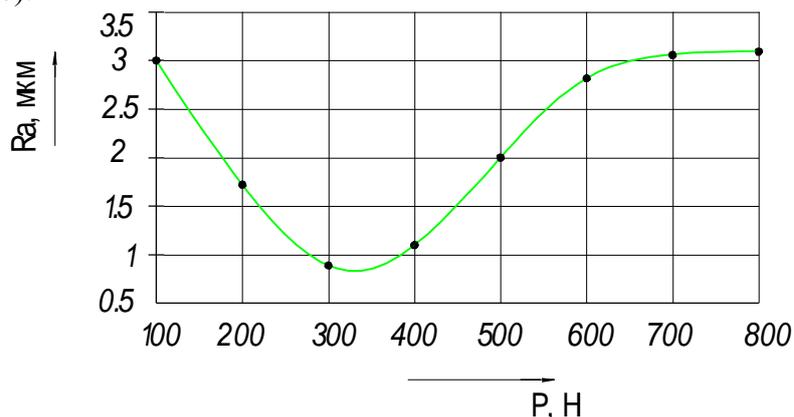


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности от приложенной нормальной нагрузки (зона II), $v=4$ м/мин

После обкатки роликом при подаче тока было достигнуто уменьшение параметра шероховатости по сравнению с обкаткой без тока приблизительно в 8 раз (рис. 7) и составила менее 0,15 мкм. При этом минимальная шероховатость достигнута, в отличие от обкатки без подачи тока, при нагрузке, равной приблизительно 600 Н. Оптимальная скорость обработки не изменилась и составила $v=4$ м/мин.

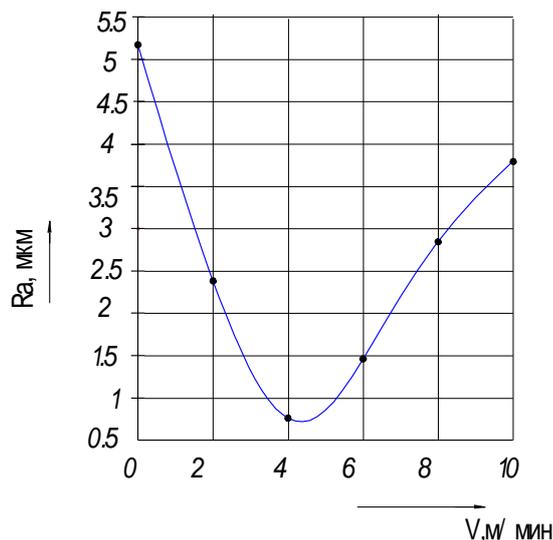


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности от скорости обработки (зона II), $P=300 \text{ Н}$

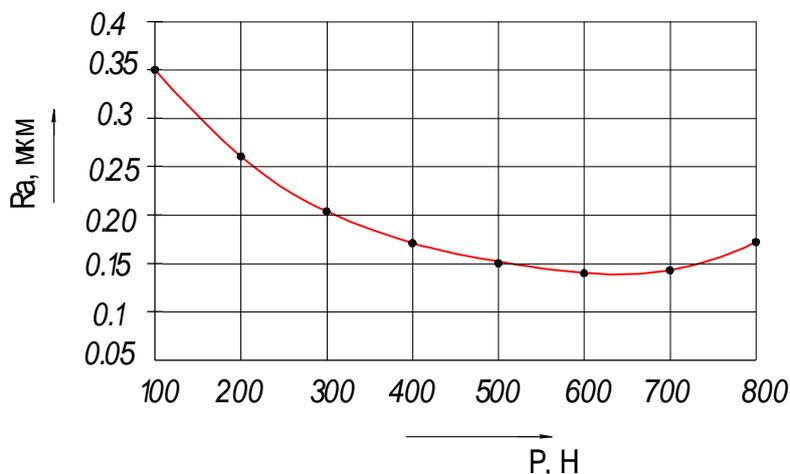


Рис. 7. Зависимость шероховатости поверхности от приложенной нормальной нагрузки при электромеханической обработке образца (зона III), $v=4 \text{ м/мин}$

Очевидно, что указанные исследования влияния технологических факторов ЭМО на шероховатость металлических поверхностей целесообразно повторить с образцами из стали 30ХГСА после улучшения.

При этом в программу испытаний представляется существенным включить определение оптимальной температуры высокого отпуска.

Таким образом, разработана установка электромеханической обработки, дающая возможность проводить данный процесс в целях упрочнения и снижения шероховатости поверхности сталей со средним содержанием углерода.

Преимуществами предлагаемого технологического процесса являются:

- повышение твердости поверхности среднеуглеродистой стали более чем в 2 раза без снижения вязкости сердцевины;
- при проведении ЭМО может быть достигнут параметр шероховатости поверхности, равный 0,15 мкм, что превосходит результаты достигавшиеся ранее только шлифованием (0,20 мкм);
- простота технической реализации процесса ЭМО на типовом промышленном оборудовании;

- данный процесс не требует существенных дополнительных трудо- и ресурсозатрат, тем самым он существенно превосходит трудоемкий процесс шлифования, применение которого к крупногабаритным деталям неэффективно и который требует высокой профессиональной квалификации, поскольку при отклонении от режимов обработки часто возникает недопустимый дефект в виде шлифовочных прижогов.

Существенно больший эффект повышения твердости и прочности при сохранении высокой ударной вязкости ожидается при применении данного метода к подвергнутым закалке и высокому отпуску образцам из стали 30ХГСА.

Установленный факт зависимости шероховатости обрабатываемой поверхности от технологических факторов имеет существенное значение для их оптимального определения в целях обеспечения требуемого параметра шероховатости сопряженных поверхностей трения в гидравлических механизмах шасси самолета.

Литература

1. Сталь марки 30ХГСА // Центральный металлический портал РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://metallischekiy-portal.ru> (дата обращения 07.03.2015).
2. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др.; Под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
3. DIN EN ISO 18265. Metallic materials. Conversion of hardness values.
4. Алиев А.А., Булгаков В.П., Приходько Б.С. Качество поверхности и свойства деталей машин // Качество поверхности и свойства деталей машин // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2004. – №. 1. – 8-12 с.
5. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
6. Повышение эксплуатационных свойств резьбовых соединений электромеханической обработкой / Л.В. Фёдорова, С.К. Фёдоров, Е.В. Нагнибедова, В.Б. Салов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет им. ВП Горячкина". – 2010. – №. 2. – 109-112 с.
7. Крагельский И.В., Михин Н.М., Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

УДК 669.715

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ AL-CA, AL-CE И AL-LA

Павел Сергеевич Бешенков⁽¹⁾, Мария Анатольевна Васина⁽²⁾

Студент 2 курса⁽¹⁾, аспирант 1 года⁽²⁾

кафедра «Материаловедение»

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: Е.А. Наумова

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Наиболее широко применяемыми литейными алюминиевыми сплавами являются силумины. Основное их достоинство – высокие технологические характеристики из-за наличия в них большого количества эвтектики (Al)+Si ((Al) – алюминиевый твердый раствор). Однако по прочности они уже не удовлетворяют требованиям быстро развивающейся техники. Поэтому

стоит рассмотреть другие эвтектические системы на основе алюминия с целью создания на их основе перспективных композиций с оптимальным комплексом прочностных и технологических свойств.

В 90-е годы 20-го столетия был создан ряд высокопрочных и жаропрочных сплавов на основе системы Al-Ni [1]. Эвтектика (Al)+Al₃Ni в этой системе образуется при 6%Ni и 640°C [6], она значительно более дисперсная, чем алюминиево-кремниевая и в процессе отжига фаза Al₃Ni довольно быстро приобретает форму округлых частиц, равномерно распределенных в алюминиевой матрице. Эти сплавы прочны, технологичны при литье и пластичны. Из них можно также получать деформированные полуфабрикаты [2,3].

Авторы работ [4] разработали несколько перспективных жаропрочных композиций на основе системы Al-Ce-Ni с тройной эвтектикой (Al)+Al₄Ce+Al₃Ni. Такая структура более дисперсная, чем двойные эвтектики. По совокупности низко- и высокотемпературных механических свойств, а также литейных характеристик эти сплавы превосходят известные жаропрочные литейные сплавы AM5 (Al19), AK12MMgH (Al30) и АЦр1У. Но никель и церий являются дорогостоящими легирующими компонентами. Поэтому эти сплавы не могут быть применены для массового производства.

С целью снижения стоимости сплавов, мы считаем целесообразным рассмотреть композиции на основе других систем, например, Al-Ca-Ce. Кальций занимает третье место среди металлов по содержанию в земной коре (после алюминия и железа) [5]. Кроме того, кальций образует с алюминием диаграмму эвтектического типа при содержании кальция в эвтектике 7.6% [6]. По дисперсности структура эвтектики (Al)+Al₄Ca не уступает алюминиево-никелевой, поэтому мы ожидаем получить в новых сплавах сочетание прочности и технологичности. Возможно, для снижения стоимости сплава, стоит применять не чистый церий, а мишметалл, в состав которого входит и лантан. Поэтому целесообразно также исследовать систему Al-Ca-La.

Целью данной работы являлось исследование структуры и свойств сплавов двойных систем Al-Ca, Al-Ce и Al-La в литом и термически обработанном состоянии для сравнения по дисперсности и склонности к формоизменению входящих в их состав интерметаллидов.

Экспериментальные методики

Составы экспериментальных сплавов представлены в таблице 1. Плавку осуществляли в электрической печи "GrafiCarbo" в графитовом тигле. Сплавы были приготовлены на основе алюминия А99. Кальций вводили в виде лигатуры Al-18%Ca, кремний, церий и лантан в чистом виде. Легирующие компоненты вводили при температуре алюминиевого расплава около 780 °С. После полного растворения шихтовых материалов давали выдержку в течение 5-10 мин при 740 °С для выравнивания состава сплава. Затем при температуре 720-740 °С снимали шлак. После чего производили разливку металла в графитовую форму при температуре 710-720 °С, получая плоские отливки с размерами 10x15x180 мм.

Термообработку отливок проводили в муфельных электрических печах SNOL 8,2/1100 с точностью поддержания температуры около 5 К. Режим отжига - 500°C, 3 часа.

Твердость по Бринеллю определяли в соответствии с ГОСТ 9012-59 на твердомере DuraVision-20/200/250 при следующих параметрах: шарик- 2,5 мм, нагрузка- 612,9 Н, время выдержки -30 с.

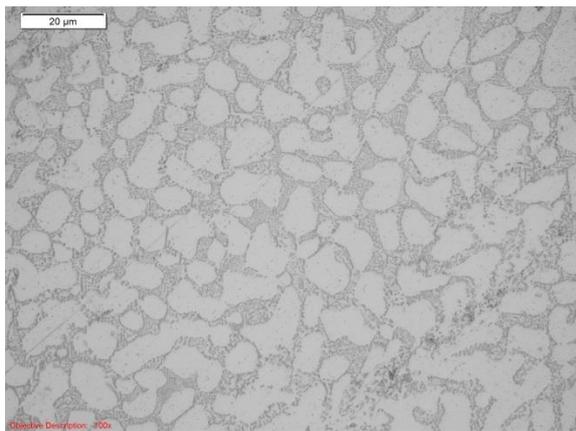
Микроструктуру литых и термообработанных образцов изучали на оптическом микроскопе Olympus GX51 (OM) и сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 (СЭМ). Микроскоп TESCAN, укомплектованный энергодисперсионной приставкой-микроанализатором производства Oxford Instruments и программным обеспечением AZtec, также использовали для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Для приготовления шлифов применяли механическую полировку с последующим травлением в реактиве Келлера.

Таблица 1. Химический состав экспериментальных сплавов

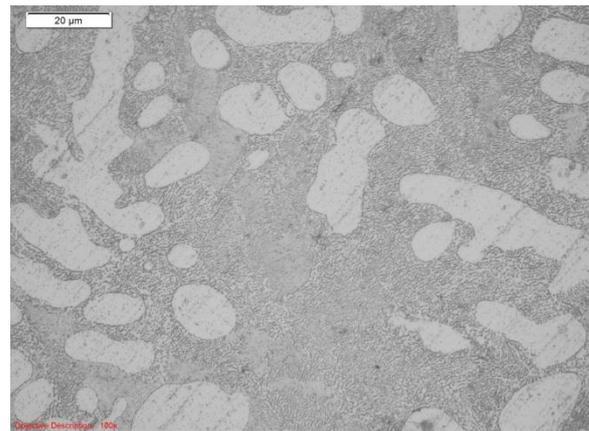
№	Система	Концентрация, масс.%					
		Ca	Ce	La	Si	Ni	Al
1	Al-Ca	4,0	-	-	-	-	основа
2		7,0	-	-	-	-	основа
3		7,6	-	-	-	-	основа
4		18,0	-	-	-	-	основа
5	Al-Ce	-	7,5	-	-	-	основа
6		-	12,0	-	-	-	основа
7	Al-La	-	-	12,0	-	-	основа
8		-	-	10,0	-	-	основа
9	Al-Si	-	-	-	11,0	-	основа
10	Al-Ni	-	-	-	-	6,0	основа

Результаты и их обсуждение

Были исследованы четыре сплава системы Al-Ca – два доэвтектических, эвтектический и заэвтектический (Таблица 1), их структуры представлены на рисунке 1. Расчет в программе Thermo-Calc и металлографические исследования согласуются с данными [6] в том, что в системе Al-Ca, эвтектика $L \rightarrow (Al) + Al_4Ca$ кристаллизуется при 7,6% Ca и 617 °С. Объемная доля эвтектики (Al)+Al₄Ca в сплаве Al-7,6%Ca составляет ~33 об.%, то есть, почти в три раза больше, чем в эвтектических силуминах. Структура сплавов 1 и 2 состоит из дендритов алюминиевого твердого раствора (Al) и дисперсной эвтектики (Al)+Al₄Ca (Рис.1а), колонии эвтектики в сплаве 3, имеющие четкие границы, вытянуты в направлении отвода тепла – от периферии к центру слитка. Первичные кристаллы отсутствуют. (Рис.1б). Первичные кристаллы фазы Al₄Ca имеют округлую форму и по данным [6] тетрагональную ОЦК решетку (10 атомов в элементарной ячейке).



а



б

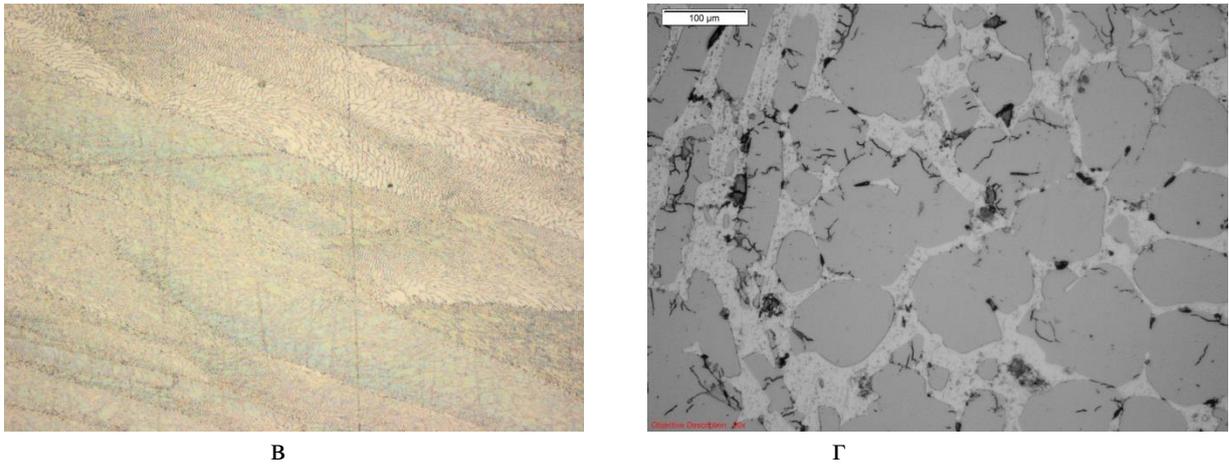


Рис. 1. Микроструктура сплавов в литом состоянии, ОМ: (а) Al-4%Ca, (б) Al-7%Ca, (в) Al-7/6%Ca, (г) Al-18%Ca, x1000

Алюминиево-цериевая эвтектика настолько же дисперсная, как и алюминиево-кальциевая (Рис. 2). В структуре сплава с 12%Ce наблюдается очень небольшое количество первичных кристаллов фазы Al_4Ce . Возможно, эвтектическая концентрация несколько ниже, чем указано в [6].

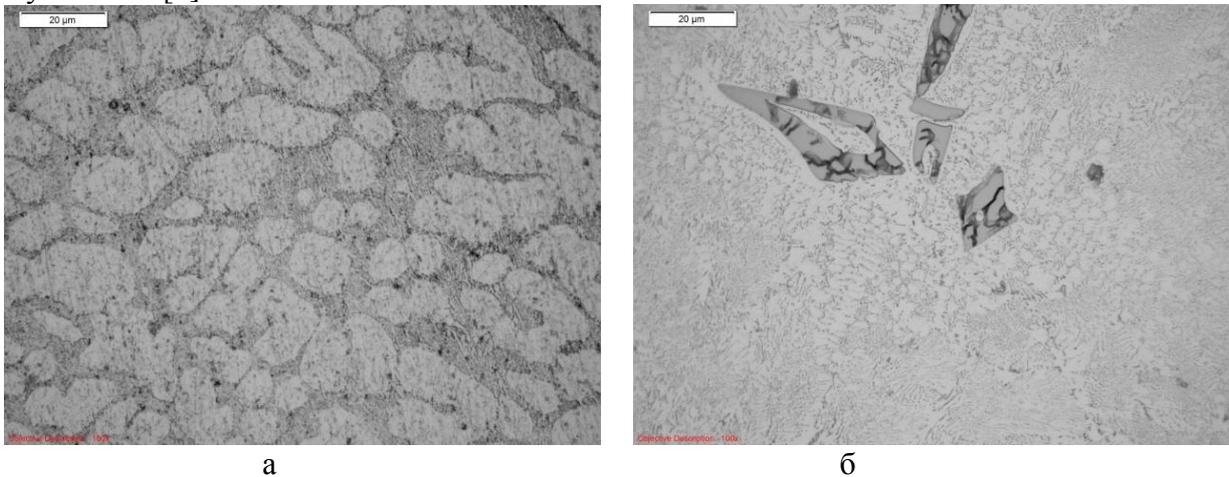


Рис. 2. Микроструктура сплавов в литом состоянии, ОМ: (а) Al-7,5%Ce, (б) Al-12%Ce, x1000

Эвтектическая структура сплавов системы Al-La несколько грубее, чем у сплавов с церием. В сплаве Al-12%La присутствует весьма значительное количество первичных кристаллов (Рис.3а), это не согласуется с данными [6].

Эвтектический сплав, полученный в данной работе, содержит 10%La (Рис.3).

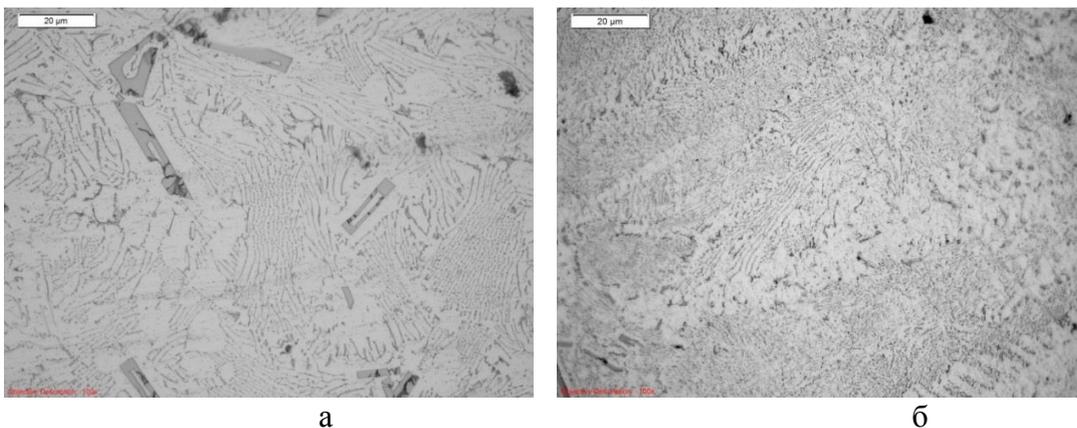


Рис. 3. Микроструктура сплавов в литом состоянии, ОМ: (а) Al-12%La, (б) Al-10%La, x1000

Сплавы систем Al-Si и Al-Ni были приготовлены для сравнительной оценки дисперсности эвтектических структур. Из представленных на рисунке 4 фотографий видно, что практически все исследованные эвтектики имеют такую же тонкую структуру, как алюминиево-никелевая, являющаяся основой высокопрочных и жаропрочных сплавов и заметно отличаются от грубой эвтектики (Al)+Si.

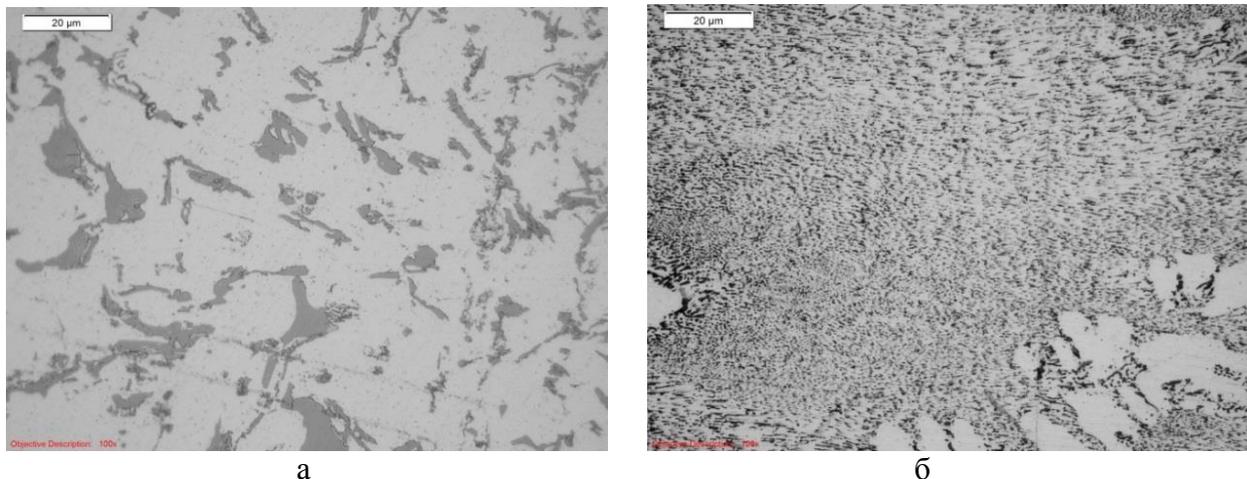


Рис. 4. Микроструктура сплавов в литом состоянии, ОМ: (а) Al-11%Si, (б) Al-6%Ni, x1000

Более детальное исследование строения эвтектик (Al)+Al₃Ni и (Al)+Al₄Ca одинакового уровня дисперсности демонстрирует существенные различия их формы. Фаза Al₃Ni, похоже, имеет стержневую форму, а эвтектика (Al)+Al₄Ca напоминает по строению ледебурит в чугунах. Здесь фаза Al₄Ca образует каркас, сквозь который «прорастают» дендриты (Al) (Рис.5).

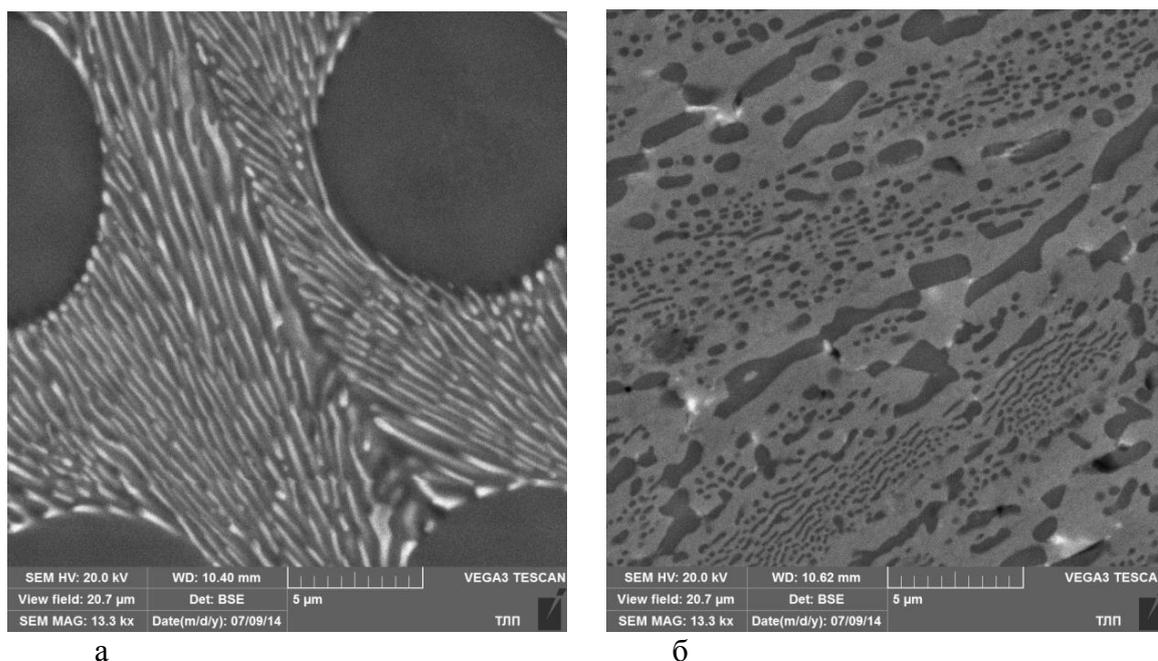


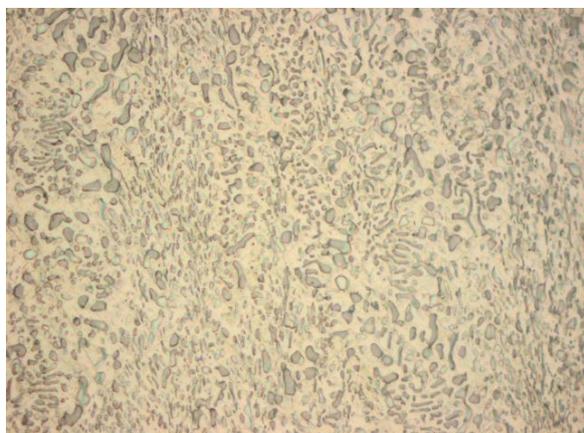
Рис. 5. Микроструктура сплавов в литом состоянии, СЭМ: (а) Al-6%Ni, (б) Al-7,6%Ca, x13000

Исследовали влияние термической обработки (отжига) на формоизменение эвтектических фаз экспериментальных сплавов. В эвтектическом сплаве Al-7,6%Ca фрагментация и округление фазы Al₄Ca проходит при температуре отжига 500⁰С, а при температуре 600⁰С частицы уже заметно огрубляются (Рис.6а). Твердость при этом

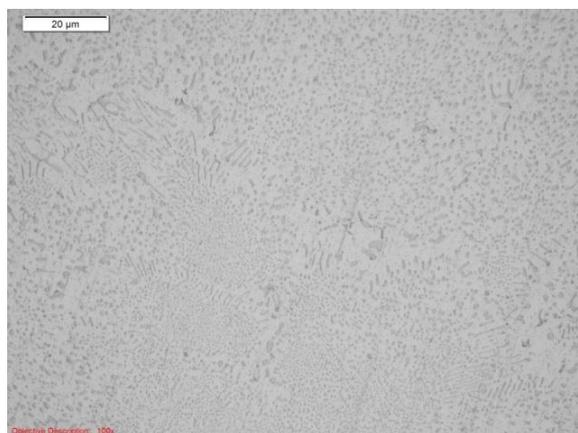
закономерно снижается (Табл.2). В сплавах Al-12%Ce и Al-10%La после отжига при 500⁰C практически не заметны изменения в структуре, и фрагментация проходит только при температуре отжига 600⁰C (Рис.6 б,в).

Таблица 2. Значения твердости сплавов в различных состояниях

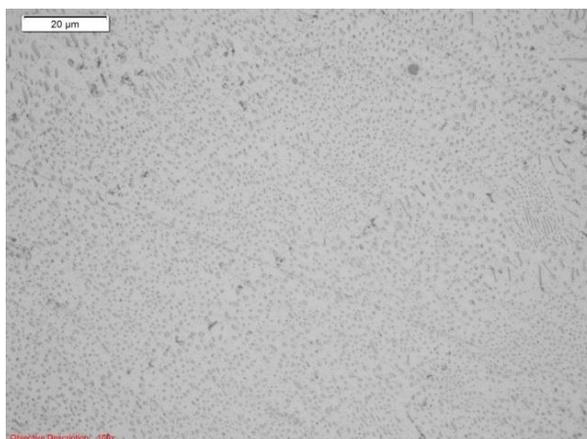
Материал	Литое состояние	После отжига 500 ⁰ C	После отжига 600 ⁰ C
Al-7,6%Ca	95,2 HB	79,7 HB	60,1 HB
Al-12%Ce	59,6 HB	52,1 HB	46,3 HB
Al-10%La	59,9 HB	49,2 HB	41,3 HB



а



б



в

Рис. 6. Микроструктура сплавов после отжига при 600⁰C состоянии, ОМ: (а) Al-7,6%Ca, (б) Al-12%Ce, (в) Al-10%La, x1000

Выводы

1. Методом металлографического анализа исследовали структуры двойных сплавов систем Al-Ca, Al-Ce, Al-La. Установлено, что эвтектическая концентрация кальция в системе Al-Ca составляет 7,6%, что соответствует данным, указанным в литературе. В системе Al-La первичные кристаллы Al₄La появляются уже при концентрациях лантана выше 10%, а в сплаве Al-12%Ce есть небольшое количество первичных кристаллов Al₄Ce. Значит, эвтектическая концентрация церия немного ниже 12%.

2. Установлено, что эвтектика (Al)+ Al₄La заметно грубее и алюминиево-кальциевой, и алюминиево-цериевой эвтектик. А исследование морфологических особенностей эвтектик (Al)+Al₃Ni и (Al)+Al₄Ca наглядно продемонстрировало, что эвтектическая фаза Al₃Ni имеет стержневую форму, а у фазы Al₄Ca более округлые очертания.

3. Исследование влияния режимов термической обработки на формоизменение эвтектических фаз показало, что фрагментация фазы Al_4Ca проходит при $500^{\circ}C$, а более высокотемпературные эвтектики $(Al)+Al_4La$ и $(Al)+Al_4Ce$ фрагментируют только при $600^{\circ}C$. Твердость при этом закономерно снижается во всех исследованных сплавах.

Литература

1. Белов Н.А., Золоторевский В.С. «Литейные сплавы на основе алюминий-никелевой эвтектики (никалины) как возможная альтернатива силуминам», Цветные металлы, 2003, №2, С.99-105.
2. Н.А. Белов. В.И.Титов, «Влияние кальция на структуру и упрочнение алюминиевых сплавов, легированных цинком и магнием», Цветные металлы, 2008, № 12 , С.64-67.
3. Н.А.Белов «Высокопрочный сплав на основе алюминия с добавкой кальция». Патент РФ № 2478132, публ. 27.03.2013, бюл.№9.
4. Belov, N.A., Naumova E.A., and Eskin, D.G. Casting alloys of the Al-Ce-Ni System: Microstructural Approach to Alloy Design // Mater. Sci. Eng. A, 1999, Vol.271, P.134-142.
5. Алюминий. Свойства и физическое металловедение: Справоч. изд. Энтони У.У., Элиот Ф.Р., Болл М.Д. / под ред. Дж.Е.Хэтча Пер.с англ. М., Металлургия, 1989, 324 с.
6. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства сплавов/ Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.

УДК 620.17

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЛУЖЕНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ВОЛОЧЕНИЕМ, СОВМЕЩЕННЫМ С КОНТАКТНЫМ ОТЖИГОМ

Ольга Витальевна Бобель⁽¹⁾, Екатерина Андреевна Сафронова⁽²⁾

Студент 5 курса⁽¹⁾

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

АО «Особое Конструкторское Бюро Кабельная Промышленность»⁽²⁾

Научный руководитель: К.О. Базалева

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Введение

Кабельные изделия эксплуатируются в самых различных условиях, в том числе в экстремальных; они находят применение в авиационной, космической, радиоэлектронной промышленности и многих других отраслях техники. В основе любого кабеля лежит проволока, и она определяет свойства кабеля. В условиях непрерывно развивающегося научно-технического прогресса необходимо постоянно совершенствовать технологию производства проволоки.

Одним из эффективных способов повышения надежности деталей машин и механизмов является нанесение на рабочую поверхность различных покрытий.

Целью данной работы является исследование свойств медной луженой проволоки, изготовленной путем гальванического лужения с последующим волочением, совмещенным с контактным отжигом. Необходимо сделать вывод о рациональности и возможности применения данного метода лужения в сравнении с используемой технологией горячего лужения.

Материалы и методики

Оценка механических свойств и качества покрытия медной проволоки производилась согласно установленным ТУ, которые приведены в таблицах 1 и 2. В таблице 1 представлены контролируемые механические свойства: σ_b – временное сопротивление разрыву, МПа и δ – относительное удлинение, %, для различных диаметров. В таблице 2 представлены номинальные размеры проволоки, допустимые отклонения и требуемая толщина покрытия. В таблице 3 представлено максимальное значение удельного электросопротивления для медной лужёной проволоки.

Таблица 1. Механические свойства

Ø, мм	σ_b , не менее, МПа (кг)	δ , не менее, %
до 0,09	196 (20)	-
0,10-0,14	196 (20)	-
0,15-0,24	196 (20)	5
0,25-0,39	196 (20)	5

Таблица 2. Номинальный размер и толщина покрытия проволоки

Ø, мм	Верхний допуск	Нижний допуск	Толщина покрытия (не более), мкм
до 0,05	+0,006	-0,002	2
св. 0,05-0,20	+0,007	-0,003	2
0,20-0,25	+0,009	-0,005	2
0,25-0,30	+0,010	-0,005	2,5
0,30-0,40	+0,012	-0,007	2,5
0,40-0,70	+0,016	-0,010	3
0,70-0,99	+0,023	-0,015	4

Таблица 3. Значение удельного электросопротивления для медной лужёной проволоки

ρ , мкОм·м	при температуре 20°C не более 0,0176
-----------------	--------------------------------------

Для исследования свойств были изготовлены образцы медной лужёной проволоки следующих диаметров с разной толщиной покрытия, представленные в таблице 4.

Таблица 4. Диаметры и толщина покрытия заготовок и изделий для исследования

Диаметр заготовки, мм	Заданная толщина покрытия, мкм	Диаметр изделия, мм
0,30	1	0,10
		0,12
	3	0,10
		0,10
	5	0,12

		0,10
0,70	3	0,26

Отбор и испытание образцов производилось в соответствии с ГОСТ 16931-71. При отборе следует иметь в виду, что проволока не должна иметь механических повреждений; образцы должны быть смотаны без растяжений, изломов, изгибов и повреждений покрытия. Для испытаний необходимо отбирать не менее 3 образца.

Для определения фактической толщины покрытий проволоки используют 2 основных метода: гравиметрический и металлографический анализы.

Гравиметрический анализ (весовой анализ) — основной метод количественного химического анализа. Этот метод основан на законе сохранения массы веществ при химических превращениях и включает в себя следующие этапы:

- взвешивание образцов и погружение их в раствор;
- перевод определяемого вещества в осадок (олово);
- отделение оловянного осадка от раствора фильтрованием и удаление примесей промыванием;
- перевод осажденной формы в весовую (гравиметрическую) форму;
- взвешивание осадка на аналитических весах;
- расчёт результатов анализа с учетом длины образца и его диаметра, массы до и после погружения в раствор.

Металлографический анализ образцов выполнялся на микроскопе типа ПМТ-3 при увеличении $\times 100$. Для проведения металлографического анализа образцов медной проволоки получали шлифы следующим образом: акриловую смолу DuroCit смешивали с отвердителем в пропорции 2:1, перемешивали и заливали в форму; пучки проволоки вертикально помещали в смолу до полного затвердевания (15 мин). Данная стадия изготовления шлифа представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Заливка шлифа

Далее извлекали полученные шлифы из формы; шлифовали плоскую поверхность образца на шлифовальной машине Struers TegraPol-11 с использованием водных суспензий различной дисперсности; промывали шлиф водой и травили хлористым железом.

Относительное удлинение и временное сопротивление разрыву определялись на автоматизированной разрывной машине с построением диаграмм растяжения образцов. Погрешности измерений составляли $\pm 1\%$ при измерении нагрузки и $\pm 2\%$ при измерении относительного удлинения.

Удельное электросопротивление – физическая величина, характеризующая способность вещества препятствовать прохождению электрического тока. Удельное электросопротивление проволоки определяют на образцах фиксированной длиной 1 м на специальном приборе. Концы проволоки подключают к клеммам прибора и замеряют удельное электросопротивление при пропускании тока через неё.

Результаты и выводы

Результаты измерения механических и электрических свойств медной луженой проволоки, полученной методом гальванического лужения с последующим волочением, совмещенным с контактным отжигом, представлены в таблице 5. На рисунке 2 представлены диаграммы механических свойств для каждого диаметра с соответствующей толщиной покрытия. Зеленой линией на диаграмме показано минимально возможное значение измеряемой величины.

Таблица 5. Результаты измерения механических и электрических свойств проволоки

Марка	Диаметр мм	Заданная т.п. ¹ , мкм	δ , %	σ , МПа	ρ , Ом·мм ² /м
ММЛ ²	0,12	1	18,5 - 21,5	260,0 - 261,3	0,0174
			21,5 - 24,5	234,0 - 242,7	-
		3	13,1 - 13,8	267,2 - 270,5	0,0184
			12,5 - 14,0	247,1 - 255,8	-
		5	12,2 - 14,6	247,3 - 252,9	0,0194
			14,5 - 20,5	212,4 - 216,8	-
	0,10	1	19,7 - 22,2	264,8 - 268,9	0,0167
			17,5 - 21,0	243,4 - 249,6	-
		3	10,9 - 16,6	264,4 - 268,0	0,0177
			14,2 - 18,4	257,07 - 262,8	0,0176
		5	16,5 - 20,0	237,16 - 249,6	-
			10,6 - 12,7	269,4 - 271,5	0,0187
	0,26	3	17,5 - 23,4	246,4 - 250,6	0,0174
			19,9 - 22,5	246,3 - 246,5	0,0173
			21,5 - 28,0	227,2 - 230,9	-
		5	15,7 - 21,8	242,2 - 250,7	0,0178
			18,0 - 20,7	243,5 - 246,2	0,0177
			20,5 - 22,0	227,2 - 230,9	-

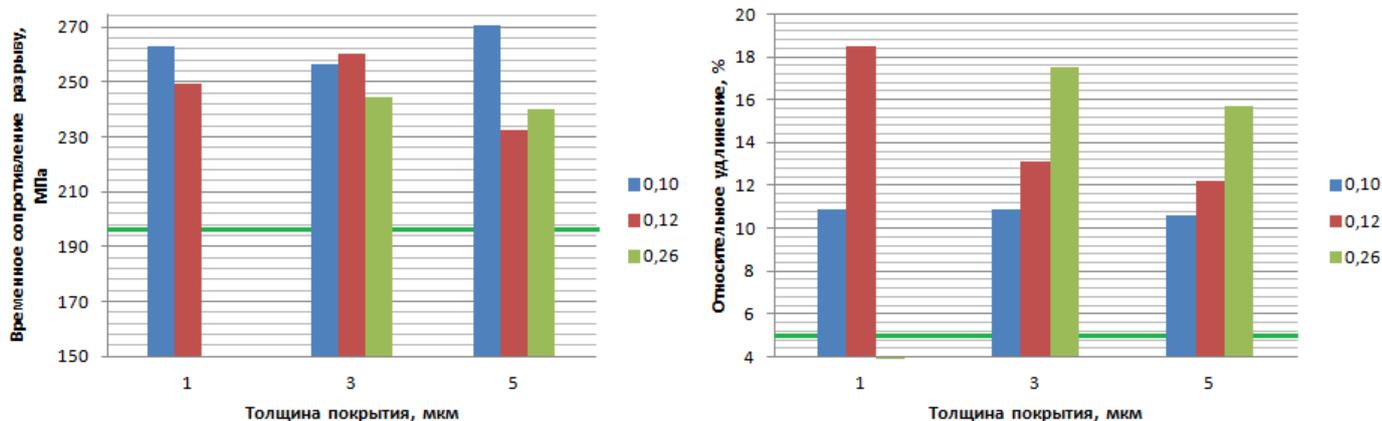


Рис. 2. Диаграммы механических свойств

¹ т.п. – толщина покрытия

² ММЛ – медь мягкая лужёная

Как видно из диаграмм, проволоки всех диаметров отвечают требованиям ТУ по механическим свойствам. Были исследованы зависимости механических свойств (временного сопротивления разрыву и относительного удлинения) от величины напряжения отжига. Для проволоки диаметром 0,26 мм с толщиной покрытий 3 и 5 мкм результаты представлены на рисунках 3 и 4.

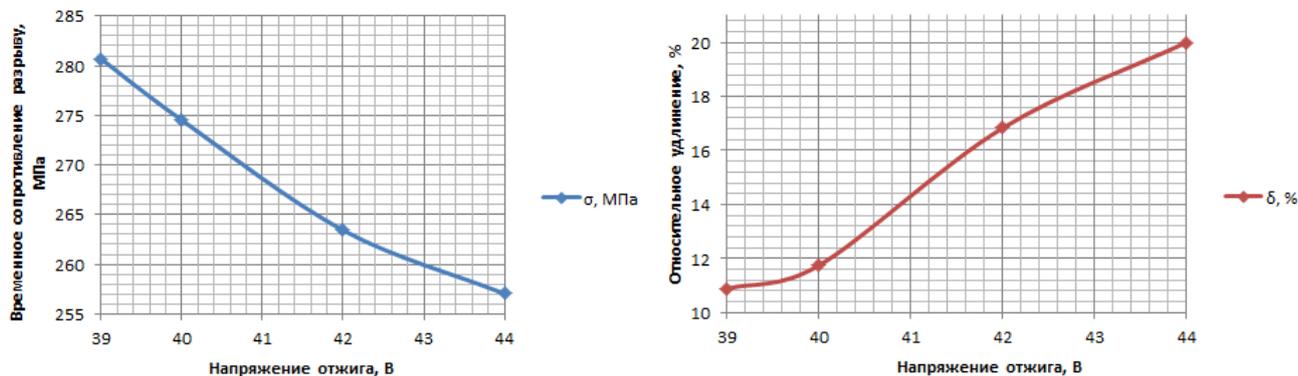


Рис. 3. Зависимость временного сопротивления разрыву (σ , МПа) и относительного удлинения (δ , %) от напряжения отжига (U , В) проволоки \varnothing 0,26 (т.п. 3 мкм)

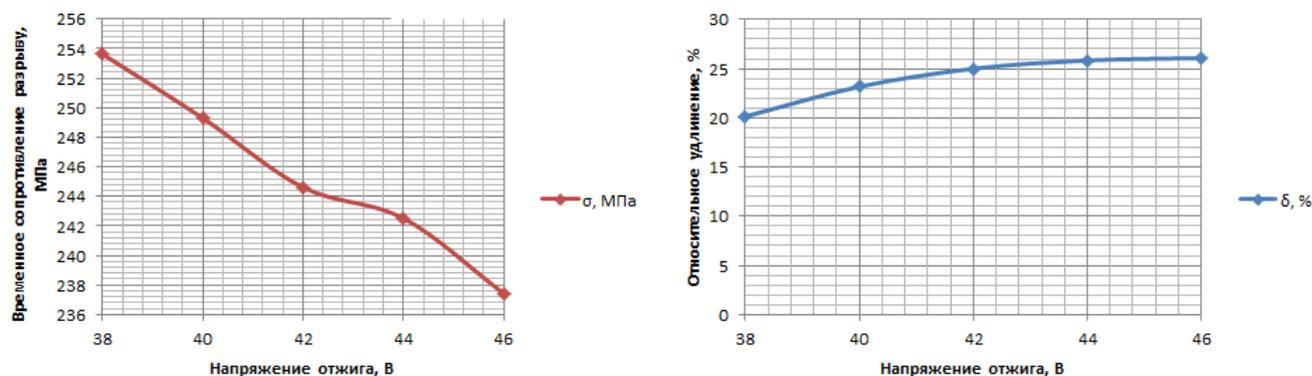


Рис.4. Зависимость временного сопротивления разрыву (σ , МПа) и относительного удлинения (δ , %) от напряжения отжига (U , В) проволоки \varnothing 0,26 (т.п. 5 мкм)

Из графиков видно, что не зависимо от толщины покрытия при увеличении напряжения отжига относительное удлинение проволоки возрастает, а временное сопротивление разрыву падает.

Результаты металлографического анализа образцов проволоки различного диаметра с покрытиями разной толщины приведены на рисунках 5 - 9.

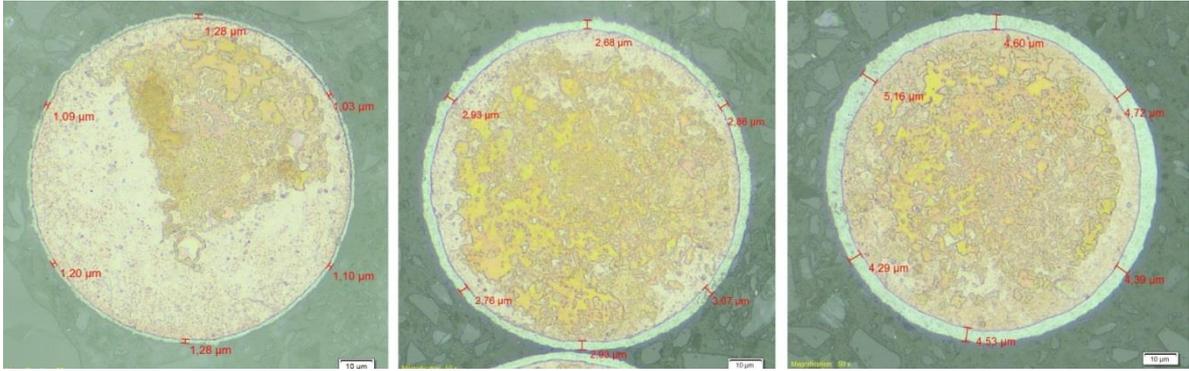


Рис. 5. Проволока $\varnothing 0,10$ с толщиной покрытия соответственно 1, 3, 5 мкм

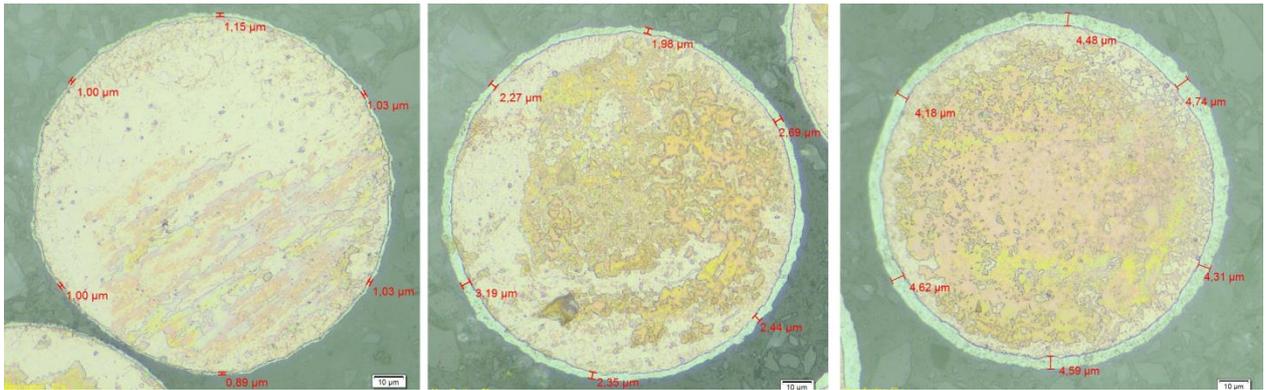


Рис. 6. Проволока $\varnothing 0,12$ с толщиной покрытия соответственно 1, 3, 5 мкм

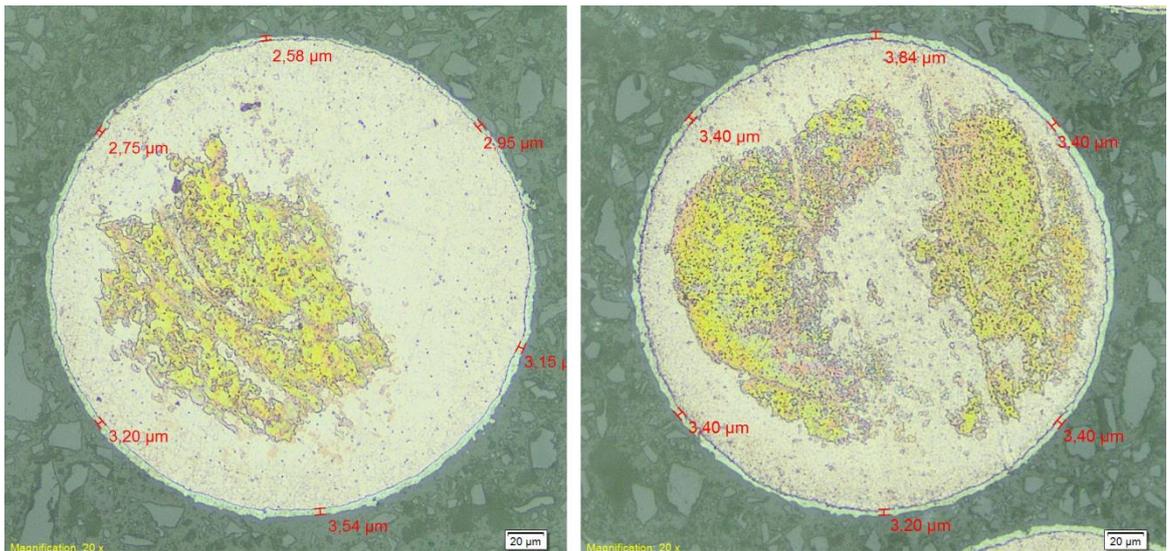


Рис. 7. Проволока $\varnothing 0,26$ с толщиной покрытия соответственно 3, 5 мкм

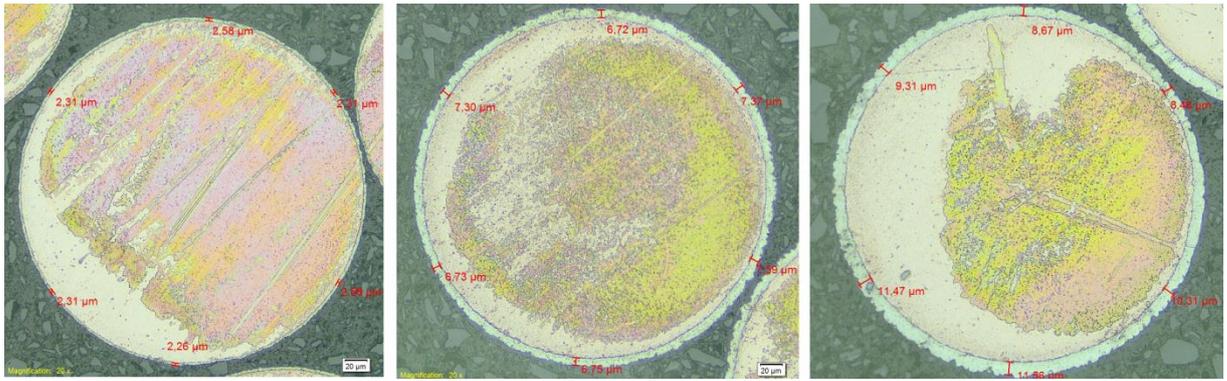


Рис. 8. Проволока Ø 0,30 с толщиной покрытия соответственно 1, 3, 5 мкм

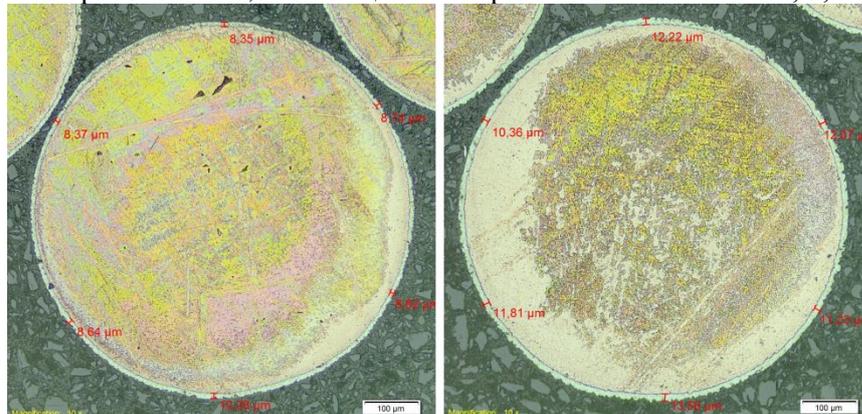


Рис. 9. Проволока Ø 0,70 с толщиной покрытия соответственно 3, 5 мкм

При анализе шлифов были выявлены фактические толщины плакирующего слоя; результаты этого определения представлены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6. Результаты определения фактической толщины покрытия проволоки Ø 0,10; 0,12; 0,26

Диаметр, мм	Заданная т.п., мкм	Фактическая толщина покрытия, мкм	
		Гравиметрический анализ	Металлографический анализ
0,10	1	1,16	1,14
	3	2,96	2,87
	5	4,61	4,72
0,12	1	1,00	1,02
	3	2,48	2,46
	5	4,48	4,49
0,26	3	3,10	3,88
	5	4,95	5,20

Таблица 7. Результаты определения фактической толщины покрытия проволоки Ø 0,30; 0,70

Диаметр заготовки, мм	Заданная т.п., мкм	Фактическая толщина покрытия, мкм	
		Гравиметрический анализ	Металлографический анализ
0,30	1	2,65	2,65
	3	8,15	7,70
	5	13,25	11,61

0,70	3	7,90	8,81
	5	11,02	11,70

В результате сравнения образцов выявлено, что фактическое значение толщины покрытия превышает заданное. Изготовление проволоки с оловянным покрытием осуществлялось на установке для гальванического нанесения покрытия по существующей программе для Ni, электрохимический эквивалент которого в 2 раза меньше электрохимического эквивалента олова (электрохимический эквивалент вещества, мг/Кл – величина, показывающая, какая масса этого вещества выделится на электроде при электролизе в результате прохождения заряда в 1 Кулон). Электрохимический эквивалент олова и никеля представлен в таблице 8.

Таблица 8. Электрохимический эквивалент олова и никеля

Химический элемент	Электрохимический эквивалент, мг/Кл
Олово	0,62
Никель	0,30

Таким образом, при лужении на этой установке при одной и той же заданной толщине покрытия олова оседает в 2 раза больше, чем никеля, что объясняет завышенное фактическое значение толщины оловянного покрытия.

Анализ шлифов изделий и заготовок показал, что проволоки Ø 0,10 и Ø 0,12 мм со средней фактической толщиной плакирующего слоя соответственно 1,15 мкм и 1,01 мкм имеют технологические значения фактической толщины покрытия, временного сопротивления разрыву, относительного удлинения и удельного электросопротивления, отвечающие требованиям ТУ. Остальные образцы имеют завышенную толщину покрытия, и не отвечают требованиям ТУ.

Медная гальванически луженая проволока после волочения с последующим контактным отжигом соответствует по механическим и электрическим свойствам требованиям ТУ.

Модернизация программы и повторный отбор опытных образцов позволит изготовить проволоку с оловянным покрытием различных диаметров, отвечающую всем требованиям ТУ.

Заключение

Проведены испытания механических и электрических свойств луженой медной проволоки, а также ее металлографический анализ. В рамках проведенного исследования были получены выводы о зависимости механических свойств от режима отжига и было изучено качество получаемого покрытия. В настоящий момент невозможно сделать вывод о пригодности метода гальванического лужения для изготовления проволок и кабелей всех назначений, особенно используемых в экстремальных условиях. Необходим ряд дальнейших испытаний и исследований.

Литература

1. Вячеславов П.М. Основы гальванотехники, – 1960г.
2. пер. с нем. Н.Б. Сциборовская Справочное руководство по гальванотехнике — 1969г.
3. Л.С. Ейльман, М.Б. Кнастер Защита проводов и кабелей от коррозии, – 1972г.
4. Лайнер В.И. Современная гальванотехника, – 1967г.
5. Белоруссова Н.И., Пешкова И.Б. Производство кабелей и проводов, – 1981г.

УДК 669.245+621.9.048+620.1

ВЛИЯНИЕ ЖАРОСТОЙКОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ НА СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

Виктория Михайловна Жук

Студент 4 курса

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научные руководители: А.С. Помельникова⁽¹⁾, А.М. Гаямов⁽²⁾

⁽¹⁾ доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

⁽²⁾ кандидат технических наук, ФГУП «ВИАМ»

В настоящее время совершенствование и увеличение мощности газотурбинных двигателей (ГТД) происходит за счет увеличения температуры газов перед турбиной и повышения степени сжатия воздуха в компрессоре. В связи с этим происходит существенное усложнение условий работы лопаток ГТД, конструкции и, как следствие, увеличение стоимости двигателя. Поэтому проблема увеличения жаростойкости и жаропрочности деталей является одной из важнейших задач в машиностроении [1].

В качестве материалов для деталей, работающих при 800 — 1100°C, наибольшее применение находят сплавы на основе никеля с последующим нанесением жаростойкого покрытия.

Жаростойкость – общий термин, характеризующий способность материала сопротивляться химическому разрушению при высоких температурах. Жаростойкие покрытия обычно предназначаются для защиты от газовой коррозии никелевых жаропрочных сплавов, которые используют для изготовления деталей энергетических машин, работающих при высоких температурах и больших нагрузках. Жаростойкими покрытиями защищают весьма дорогостоящие детали ответственных энергетических машин. Успешное применение покрытий дает большой экономический эффект.

Можно сформулировать следующие требования, предъявляемые к жаростойким покрытиям [2,3]:

1. Жаростойкие покрытия должны обеспечивать защиту напряженных деталей от газовой коррозии при температурах 1000—1150°C в условиях циклического изменения температуры и наличия вредных примесей в продуктах сгорания топлива. Важнейшее требование, предъявляемое к жаростойким покрытиям - их долговечность. Для этого, с точки зрения длительной сопротивляемости окислению, они должны быть сравнительно толстыми и стабильными.

2. Покрытия должны характеризоваться минимальной скоростью диффузионного обмена с подложкой для того, чтобы защитные свойства покрытия в процессе эксплуатации не изменялись быстро. Стабильность покрытия важна и из соображений высокой сопротивляемости ползучести и разрушению защищаемого материала.

3. Покрытие должно обладать достаточной пластичностью и прочностью для того, чтобы оно не растрескивалось под влиянием термических и механических ударов и не оказывало отрицательного влияния на прочность защищаемой детали. Последнее достигается в том случае, если прочностные свойства покрытия и подложки близки. Обычно жаростойкие покрытия обладают меньшей прочностью, чем защищаемый материал, поэтому, когда толщины покрытия и детали оказываются сравнимыми, то покрытие, как правило, оказывает

отрицательное влияние на жаропрочность материала детали. Из этих соображений покрытие должно быть достаточно тонким.

4. Для деталей газотурбинных установок большое значение имеет эрозионная стойкость покрытий, так как поверхность таких деталей подвергается действию мелких твердых частиц, засасываемых в газоздушный тракт двигателя. Поэтому покрытия должны обладать высокой твердостью.

5. Технология нанесения покрытия должна быть устойчивой, т.е. небольшие отклонения от средних характеристик режима нанесения не должны оказывать существенного влияния на состав и толщину покрытия. Технология должна включать надежные методы контроля состава, толщины, сплошности, адгезии покрытия к подложке, характеристик покрытия, которые определяют его долговечность и влияние на прочность защищаемой детали.

6. Затраты на нанесение покрытия должны окупаться при эксплуатации деталей с покрытиями прежде всего за счет увеличения срока службы деталей.

7. Покрытие должно быть таким, чтобы было возможно полное удаление поврежденного покрытия и нанесение нового.

Основываясь на этих общих условиях, рассмотрим требования, предъявляемые к составу жаростойких покрытий [3,4].

Наиболее высокими защитными свойствами в условиях высокотемпературного окисления обладает оксидная пленка из Al_2O_3 . Поэтому важнейшим элементом в жаростойком покрытии является алюминий и в качестве жаростойких применяются алюминидные покрытия. Поскольку при циклических изменениях температуры пленка из Al_2O_3 разрушается, то для ее восстановления покрытие должно содержать достаточный запас алюминия. Чем больше алюминия в покрытии, тем выше его долговечность. Исходя из этого условия, основной фазой в покрытии является β -фаза – твердый раствор на основе интерметаллида $NiAl$, так как она содержит значительное количество Al и достаточно тугоплавка (рис. 1). Однако вводить очень большие количества алюминия в покрытие путем увеличения его концентрации или путем увеличения толщины покрытия нельзя, так как и в том, и в другом случае увеличивается его склонность к растрескиванию и усиливается отрицательное влияние покрытия на прочность детали. Оптимальное содержание алюминия в покрытии зависит от конструкции и условий эксплуатации защищаемой детали.

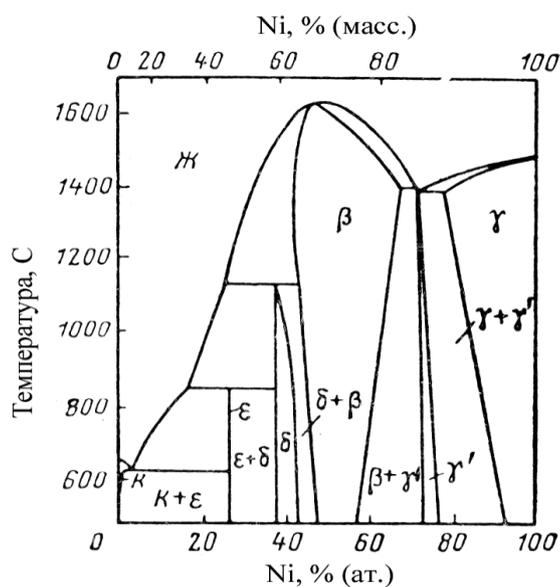


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Ni-Al

Важнейшим элементом, наличие которого необходимо в алюминидном покрытии, является хром. Хром вводят для увеличения жаростойкости покрытия, так как он увеличивает

активность алюминия. Поэтому при наличии 8 — 10 % Cr и содержании всего лишь 5 — 6 % Al в покрытии образуется оксидная пленка из Al_2O_3 с высокими защитными свойствами, в то время как в отсутствие хрома для образования сплошной пленки из Al_2O_3 необходимо не менее 15 % Al. Благодаря этой способности хрома можно указать состав покрытия (например, Ni - 15 % Cr - 12 % Al), которое обладает высокой жаростойкостью, так как на нем образуется пленка из Al_2O_3 , и высокой пластичностью, так как оно содержит сравнительно немного алюминия. Кроме того, никельхромалюминиевые сплавы, содержащие 15 и более % Cr обладают высокой сопротивляемостью сульфидной коррозии.

Кроме хрома, в покрытие целесообразно вводить элементы, которые улучшают сцепление оксидной пленки с металлом или сопротивляемость сульфидной коррозии. Для этих целей используют малые добавки иттрия, гафния и кремния.

Анализ существующих методов получения многокомпонентных покрытий [1-5] показывает, что наиболее приемлемыми являются методы, базирующиеся на процессах физического испарения материалов в вакууме: различные виды термического испарения в вакууме, и в первую очередь электронно-лучевое испарение, вакуумно-дуговое испарение и магнетронное распыление [5].

При вакуумно-дуговом испарении конденсация осуществляется из плазмы испаряемого материала покрытия при высоких и управляемых энергиях частиц, что обеспечивает [6]:

- управляемый нагрев и термоактивацию подложки в процессе осаждения покрытия;
- окончательную очистку покрываемой поверхности путем бомбардировки ее ионами материала покрытия;
- высокую плотность материала покрытия (уплотнение за счет ионной бомбардировки);
- адгезию покрытия на уровне прочности слабого звена в системе сплав - покрытие;
- высокую точность и воспроизводимость процесса осаждения покрытия при заданных и постоянных электрических параметрах (ток генератора плазмы, напряжение на подложке, уровень напряжения на генераторе плазмы);
- субмелкозернистую (пластичную) структуру покрытия, возможность управления структурой.

По способу формирования жаростойкие ионно-плазменные покрытия делятся на:

- конденсированные;
- диффузионные.

Конденсированные покрытия формируются непосредственно в процессе их нанесения. Основа таких покрытий – никель. Эти покрытия маркируются следующим образом: СДП + порядковый №. Заключительной операцией является вакуумный отжиг, который проводится с целью стабилизации структуры.

К диффузионным покрытиям относятся алюминидные покрытия. В этом случае необходимая жаростойкая β -фаза (NiAl) формируется уже после нанесения покрытия на стадии вакуумного отжига за счет взаимной диффузии Ni и Al через границу «сплав-покрытие». Эти покрытия маркируются следующим образом: ВСДП - 11...12...

Широко применяются конденсационно-диффузионные покрытия, наносимые в 2 этапа. Вначале наносится конденсированный слой, затем диффузионный, после чего проводят вакуумный отжиг. В процесс отжига протекает взаимная диффузия Ni и Al через границу «конденсированный слой - диффузионный слой».

Таблица 1. Химический состав сплава СДП-2

Сплав	Содержание легирующих элементов, вес. %											
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ni	Nb	Zr	B	Y
СДП-2	-	20	-	-	-	12	-	осн	-	-	-	0,3

Остановимся на получении конденсированного покрытия, так как при одних и тех же условиях эксплуатации они характеризуются наибольшей долговечностью, по сравнению с диффузионными покрытиями [4-7].

В качестве примера было выбрано покрытие из сплава СДП-2, химический состав которого приведен в табл.1.

Сплав СДП-2 состоит из многокомпонентных сплавов системы Me—Cr—Al—Y, обеспечивающих высокую жаростойкость в контакте с жаропрочными сплавами на уровне (15–25) г/м² при температурах 1050–1100°С на базе 1000 ч (рис. 2) и позволяющих повысить на 10–15% жаропрочность основного материала при больших базах испытаний (500–1000 ч) и температурах 975–1100°С и в 2–5 раз и более термостойкость композиции сплав — покрытие при термоциклировании по режиму 1000—1100°С ± 200°С (время нагрева и охлаждения образца 1 мин).

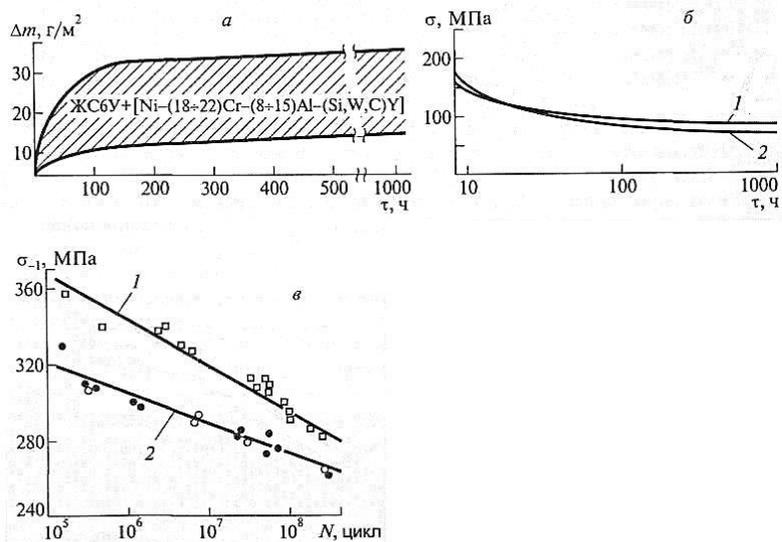


Рис. 2. Жаростойкость (а), длительная прочность (б) и выносливость (в) композиций сплав - конденсированное покрытие ($\delta = 50\text{--}60 \text{ мкм}$):

- а) $T = 1100^\circ\text{C}$;
 б) 1 - ЖС6У + (Ni-20Cr-10Al-0,2Y), $T = 1050^\circ\text{C}$;
 2 - ЖС6У, $T = 1050^\circ\text{C}$;
 в) $T = 975^\circ\text{C}$;
 1 - ЖС6У;
 2 - ЖС6У + (Ni-20Cr-10Al-0,2Y)

В покрытиях системы Me—Cr—Al—Y в исходном состоянии после осаждения и вакуумного термостабилизирующего отжига наводятся внутренние напряжения растяжения термического характера величиной 30—200 МПа, которые релаксируют при температуре нагрева 600–800°С и изменяют свой знак при больших температурах. Покрытия системы Me—Cr—Al—Y обычно снижают на 5—15% предел выносливости жаропрочного сплава при высоких температурах.

Характерными особенностями ионно-плазменных конденсированных покрытий системы Me—Cr—Al—Y являются их мелкодисперсная структура, высокая стойкость к образованию трещин термоусталости, высокая адгезия (свыше 100 МПа), а также высокая точность по толщине и элементному составу и сравнительно низкая стоимость. Эти особенности ионно-плазменных покрытий обеспечивают их высокую термостойкость в контакте с жаропрочными сплавами и минимальное влияние на механические характеристики материала основы, а в ряде случаев позволяют значительно повысить свойства композиции сплав - покрытие, например, малоцикловую усталость, термостойкость, жаропрочность при больших базах испытаний.

Долговечность конденсированного покрытия из сплава СДП-2 ограниченной толщины (для лопаток турбины теплонапряженных ГТД $\delta < 80-100$ мкм), работающего при температурах $\sim 1100^\circ\text{C}$ с кратковременными «забросами» до $1150-1200^\circ\text{C}$ не превышает 500-600 ч. С экономической и технической точек зрения применение покрытия из сплава СДП-2 целесообразно для лопаток турбин теплонапряженных ГТД, работающих при температурах $1050-1100^\circ\text{C}$.

В настоящей работе в качестве основы был выбран жаропрочный никелевый сплав ЖС6У, химический состав которого представлен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав сплава ЖС6У

Сплав	Содержание легирующих элементов, вес. %											
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ni	Nb	Zr	V	Y
ЖС6У	0,18	9,0	9,8	10,3	1,5	5,4	2,6	осн	1,0	0,04	0,02	-

Структура сплава ЖС6У состоит из матрицы (γ -фазы) представляющей собой сложнолегированный твердый раствор на основе никеля, и γ' -фазы — твердого раствора на основе интерметаллидного соединения Ni_3Al . При этом высокий уровень жаропрочности обусловлен упрочнением γ -твердого раствора легирующими элементами и γ' -фазой. Последняя является главным упрочнителем, так как её частицы создают надежные препятствия для скольжения и переползания дислокаций в условиях высокотемпературной ползучести. Основная часть γ' -фазы образуется при распаде пересыщенного γ -твердого раствора; γ' -фаза имеет структуру типа Cu_3Au с параметром, близким к параметру решетки γ -матрицы.

Целью работы являлось исследование структуры и жаростойкости образцов из сплава ЖС6У после различных режимов получения жаростойкого покрытия и термической обработки. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести подготовку поверхности образцов для нанесения покрытий.
2. Нанести покрытие по различным режимам.
3. Провести вакуумный отжиг образцов по различным схемам.
4. Изучить микроструктуру полученных покрытий.
5. Определить жаростойкость образцов с покрытиями.

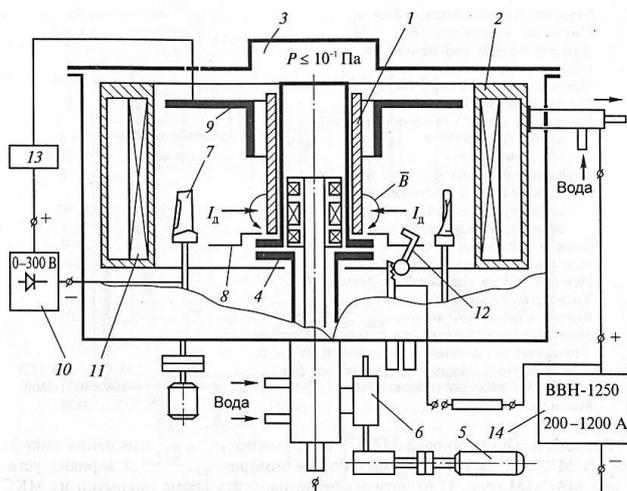


Рис. 3. Принципиальная схема установки МАП-1М (B — магнитное поле; I_d — ток дуги): 1 — катод; 2 — анод; 3 — вакуумная камера; 4 — электромагнитный фиксатор катодных пятен; 5, 6 — привод перемещения катода; 7 — покрываемые изделия; 8 — экран катода; 9 — опорный электрод; 10 — источник подачи отрицательного потенциала на изделия; 11 — магнитная катушка; 12 — поджигающий электрод; 13 — блок защиты изделий от микродуговых привязок; 14 — источник питания вакуумной дуги.

Подготовка образцов к нанесению покрытия состояла из операций:

1. Входной контроль – лупа, бинокляр, весы аналитические.
2. Обезжиривание, сушка – ванны, вытяжные шкафы.
3. Поверхностная обработка – пескоструйная обработка.
4. Ультразвуковая промывка, сушка – ванна, вакуумный сушильный шкаф.
5. Сборка в кассеты – монтажный стол, специальная тара.

Нанесение покрытий проводилось на установке МАП-1М, созданной в ВИАМ и не имеющей до настоящего времени аналогов в мировой практике. Принципиальная схема установки приведена на рис. 3.

Основные технологические характеристики установки МАП-1М представлены в табл.3.

Таблица 3. Технические характеристики установки МАП-1М

Параметры	Значения параметров
Установочная мощность, кВт	80
Питающее напряжение, В	3x380
Расход воды, м ³ /ч	1,8
Предельное разрежение, Па (мм.рт.ст.)	6,8x10 ⁻³ (5 x 10 ⁻⁵)
Количество каналов для подачи реактивного газа, шт	3
Диапазон регулирования расхода газа для 1,(2 ,3) каналов нл/ч	0,36-3,6 (3,6-36)
Газоразрядный источник ионов аргона: - рабочее напряжение, кВ - ток разряда, мА	1-2,5 150-200
Вакуумный дуговой генератор плазмы: - напряжение дуги, В - ток дуги, А	35±2 200 – 750
Скорость испарения при токе дуги 700 А, г/мин	4 ±1
Напряжение на покрываемых деталях, В	10 – 900
Ионный ток на покрываемых деталях, А	до 50
Количество вращающихся позиций для установки покрываемых деталей, шт	24
Высота зоны покрытия вдоль оси вращения, мм	≤200
Максимальный диаметр покрываемых деталей вращения, мм (шт.)	65 (24); 130 (12)
Габариты установки, мм	2000x4600x2700
Масса установки, кг	1950

При исследовании были использованы образцы цилиндрической формы, изготовленные из сплава ЖС6У длиной 30 мм и диаметром 10 мм и конденсированное покрытие из сплава СДП-2, химические составы которых приведены в табл. 1,2.

Покрытия получали по различным режимам напыления. На первой стадии покрытия наносились на образцы при различных потенциалах подложки и токе разряда. После напыления часть образцов была подвержена термической обработке в вакууме при температуре 1050°С в течение 4 ч (табл. 4).

Таблица 4. Режимы напыления покрытий при различных токах разряда и потенциалах подложки

№ образца	Ток разряда I, А	Потенциал подложки U, В	Режим термообработки
1	700	10	-
2	700	50	-
3	700	100	-
4	900	10	-

5	700	10	1050°C, 4 ч
6	700	50	1050°C, 4 ч
7	700	100	1050°C, 4 ч

Методы исследования, используемые в работе:

1. Микроструктуру покрытий изучали с помощью оптического металлографического микроскопа «Versamet» $\times 800$ и электронного микроскопа «Хитачи 200» $\times 10000$. Тонкие фольги для просвечивающей электронной микроскопии готовили по методике, принятой для жаропрочных сплавов. Фольги готовили механически, а затем электрополировкой в электролите: хлорная кислота и ледяная уксусная кислота.

2. Испытания на жаростойкость проводились в спокойной атмосфере печи на воздухе. Образцы с покрытиями размещали в алундовых тиглях с крышками. Испытания проводились при температуре 1100°C в течение 400 ч. Через каждые 100 ч экспозиции проводили визуальный осмотр состояния поверхности и взвешивание образцов вместе с осыпавшейся окалиной с точностью 0,0001 г.

Анализ микроструктуры покрытия показал следующее.

При изменении потенциала подложки от 10 до 100 В (рис. 4) видно, что при постоянном токе разряда 700 А происходит существенное изменение микроструктуры покрытия. Так, при потенциале подложки 10 В покрытие неоднородное, наблюдаются трещины (рис. 4, а). С увеличением потенциала подложки покрытие становится более однородным, трещины не образуются (рис. 4, б, в).

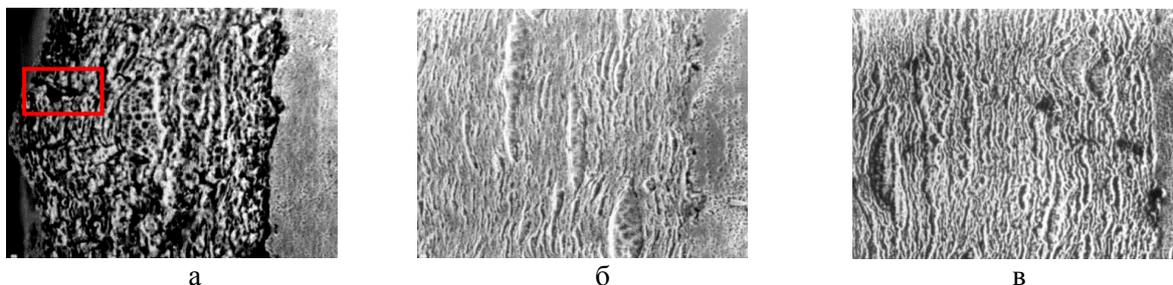


Рис. 4. Микроструктура многокомпонентного покрытия СДП-2, полученного в результате следующих режимов напыления: а) $I=700$ А; $U=10$ В (обр. №1) $\times 800$; б) $I=700$ А; $U=50$ В (обр. №2) $\times 10000$; в) $I=700$ А; $U=100$ В (обр. №3) $\times 10000$

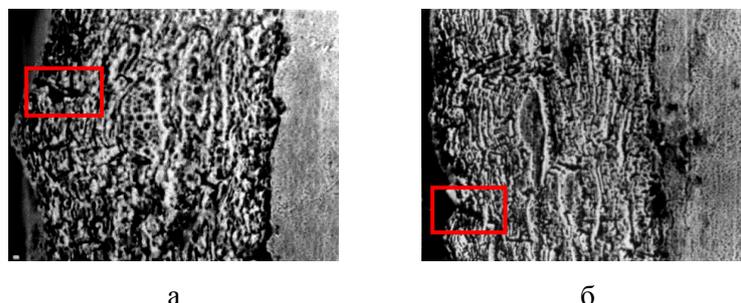


Рис. 5. Микроструктура многокомпонентного покрытия СДП-2, полученного в результате следующих режимов напыления:
а) $I=700$ А; $U=10$ В (обр. №1) $\times 800$
б) $I=900$ А; $U=10$ В (обр. №4) $\times 800$.

Выделение капельной фазы происходит во всех случаях, но с увеличением потенциала подложки до 100 В она становится более мелкодисперсной. При изменении тока разряда от 500 А до 900 А при потенциале подложки 10 В структура покрытия существенно не изменяется.

Покрывание неоднородное, происходит образование трещин (рис. 5). Происходит также выделение капельной фазы, форма и размеры которой практически не изменяются.

Таким образом, исследования микроструктуры показывают, что на формирование микроструктуры покрытия в большей степени влияет потенциал подложки, чем ток разряда.

Были проведены также исследования структуры покрытия после термической обработки в вакууме при 1050°C в течение 4 ч. Анализ структуры показал, что после вакуумного отжига формируется структура в виде зерен различного размера с мелкодисперсными включениями при получении покрытия по режиму: ток разряда 700 А и потенциал подложки 10В, 50 В и 100 В (рис. 6). При потенциале подложки 10 В образуется ультрамелкозернистая микродуплексная структура.

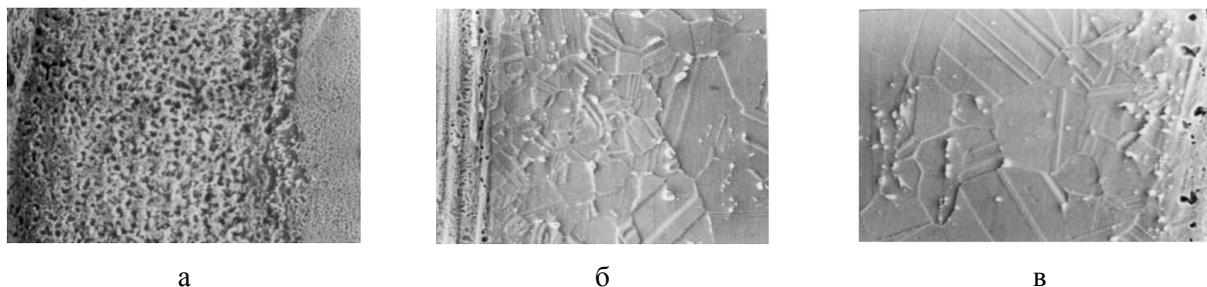


Рис. 6. Микроструктура многокомпонентного покрытия СДП-2, полученного в результате следующих режимов напыления с последующим вакуумным отжигом при 1050°C в течение 4 ч:

- а) $I=700\text{A}$, $U=10\text{В}$ (обр. № 5) $\times 800$
 б) $I=700\text{ А}$, $U=50\text{ В}$ (обр. № 6) $\times 10000$
 в) $I=700\text{ А}$, $U=100\text{ В}$ (обр. № 7) $\times 10000$.

По результатам испытаний на жаростойкость построена кривая жаростойкости для сплава ЖС6У (рис. 7).

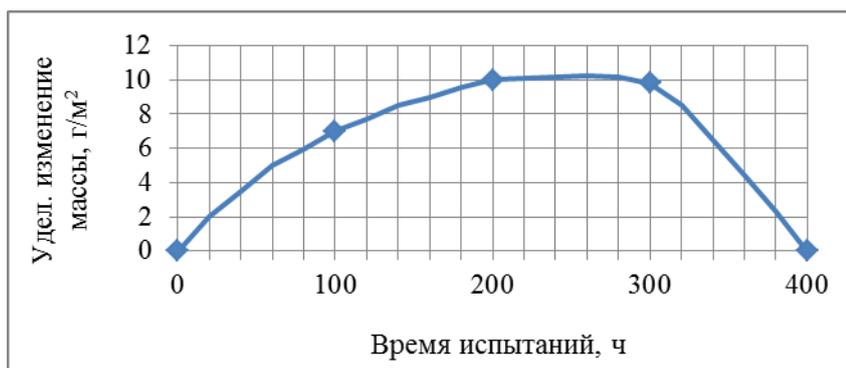


Рис. 7. Удельное изменение массы на поверхности образцов из сплава ЖС6У с покрытием СДП-2 при температуре 1100°C .

Из рис. 7 видно, что после 200 ч эксплуатации окисление идет регрессивно и практически не приводит к образованию новых оксидов на поверхности.

Выводы

1. Микроструктура конденсированных ионно-плазменных покрытий формируется в 2 этапа: непосредственно при нанесении и затем окончательно при вакуумном отжиге.
2. Установлено, что микроструктура и качество покрытия системы Ni-Cr-Al-Y в большей степени зависят от потенциала подложки и в меньшей степени от тока разряда.
3. Показано, что нанесение покрытия из сплава СДП-2 позволяет увеличить жаростойкость и, соответственно, долговечность и срок эксплуатации деталей.
- 4.

Литература

1. *Каблов Е.Н.* Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: МИСИС, 2006, 632 с.
2. *Коломыцев П.Т.* Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984, 216 с.
3. *Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р.* Жаропрочность никелевых сплавов. - М.: Машиностроение, 2001. - 463 с.
4. *Мовчан Б.А., Малащенко И.С.* Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – Киев: Наук. Думка, 1983. – 232 с.
5. *Тамарин Ю.А.* Жаростойкие диффузионные покрытия лопаток ГТД. - М.: Машиностроение, 1978. - 133 с.
6. *Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С. А.* и др. Авиационные материалы на рубеже XX-XXI веков: Сб. тр. - М.: ВИАМ, 1994, с. 314-325.
7. *Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В.* Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36ВИ // МиТОМ. - 2011. - №1. - С. 34-40.

УДК 67.017

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАННОГО КОМПЛЕКСА СВОЙСТВ ИЗ ГРАНУЛИРУЕМОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭП741НП

Татьяна Геннадьевна Жукова

Студентка 4 курса

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научные руководители: А.И. Логачёва⁽¹⁾, Ю.А. Курганова⁽²⁾

кандидат технических наук, профессор-исследователь, заместитель начальника отдела института ОАО «Композит»⁽¹⁾, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Материаловедение»⁽²⁾

В настоящее время активно ведутся разработки по усовершенствованию дисков газотурбинных двигателей (ГТД) в авиа- и ракетостроении. Диск ГТД входит в состав ротора турбины и служит для установки рабочих лопаток, создающих крутящий момент, и передачи этого момента с лопаток на вал. Диск расположен в роторе после камеры сгорания и на него оказывает воздействие следующий спектр нагрузок:

- газовые, вызванные перепадом давления в газовом тракте двигателя и изменением скорости и направления газового потока;
- массовые, возникающие при вращении ротора двигателя;
- температурные, которые возникают из-за неравномерного нагрева и/или охлаждения деталей, различного коэффициента линейного расширения их материалов.

К материалу дисков ГТД предъявляется сложный комплекс свойств:

- высокий уровень длительной и кратковременной прочности во всем диапазоне рабочих температур 1050 МПа;
- низкая чувствительность к концентраторам напряжений при статическом нагружении;
- высокая пластичность при длительном и кратковременном нагружении;
- достаточно высокое сопротивление малоциклового усталости;
- стабильность структуры и фазового состава;

- хорошая технологичность.

В настоящее время основным материалом для изготовления диска ротора турбины служат жаропрочные никелевые сплавы.

Повышение требований к материалам по жаропрочности и связанное с этим усложнение состава сплавов привело к тому, что стало проблематичным получение заготовок деталей.

Решением обозначенной проблемы стала технология гранульной металлургии.

Гранульная металлургия стала технологией, которая позволяет получать новые материалы, в том числе композиционные, с заданными свойствами.

Данная технология включает в себя такие этапы, как: получение порошков, изготовление заготовок и их последующую обработку, что дает возможность получать изделия с заданным комплексом свойств, размеров и формы без использования последующей механической обработки.

Технология гранульной металлургии обеспечивает ряд следующих особенностей, полученного материала:

- минимальную дендритную и зональную ликвацию, что в свою очередь позволяет реализовать высокий уровень равномерности механических характеристик во всем объеме деталей;

- существенное улучшение деформируемости материалов, при этом в ряде технологических процессов деформировать материал не требуется, поскольку возможным становится получение деталей с окончательными размерами сложной формы;

- лучшую обрабатываемость механическим инструментом, что существенно снижает трудозатраты и себестоимость;

- возможность получать целые сложные узлы, ранее изготавливаемые из отдельных деталей, которые затем соединяли сваркой или другими способами. На сегодняшний день известно два способа получения гранул:

- газоструйное распыление жидкого металла;

- центробежное плазменное распыление.

Газоструйное распыление используют реже из-за содержания большого количества неметаллических частиц, попавших вследствие получения жидкого металла расплавлением в керамическом тигле, по сравнению с плазменным распылением. Во втором случае получение гранул идет за счет распыления высокоэнергетической плазмой вращающегося с большой скоростью электрода заданного сплава.

В ОАО «Композит» для получения гранул используют центробежное плазменное распыление быстровращающегося электрода на установке центробежного распыления (УЦР).

Основными этапами технологии гранульной металлургии являются:

1. Контроль качества исходной заготовки для получения гранул

2. Распыление жидкого сплава (металла);

3. Рассев гранул, сепарация и очистка их от металлических и неметаллических

включений;

4. Засыпка гранул и их герметизация в капсулах;

5. Газостатическая обработка;

6. Термическая обработка (ТО);

1. Контроль качества исходного сырья для получения гранул

Исходным материалом для получения гранул служит электрод из материала, который нужно распылить – в данном случае из никеля и его сплавов. Электрод имеет диаметр 55 или 75 мм, длину – 600 мм. Геометрия параметров связана с техническими характеристиками устройства подачи электрода в камеру распыления. Электроды из никелевых сплавов получают методом двойного переплава – вакуумно-индукционная плавка (ВИП) и вакуумно-дуговая плавка (ВДП). Для того, чтобы получить гранулы соответствующего качества требуется

осуществление входного контроля исходного материала. Входной контроль проходит в две стадии: визуальный осмотр и химический анализ.

На первой стадии входного контроля проводится осмотр электрода на наличие вмятин, выпуклостей, проверяется геометрия, размеры электрода должны соответствовать размерам на чертеже. Для определения наличия полостей электрод проверяется с помощью УЗК (ультразвуковой контроль).

На второй стадии проводится химический анализ на наличие кислорода. Этот анализ является наиболее важным, так как предельное содержание кислорода в электроде из никелевых сплавах должно составлять не более 0,007 масс. % из – за того, что наличие кислорода отрицательно сказывается на прочностных, коррозионных и жаростойких характеристиках.

Химический анализ проводится методом восстановительного плавления в соответствии с ГОСТ. После проведения входного контроля делается вывод о пригодности проверяемого электрода для получения гранул. Он должен соответствовать следующим требованиям:

- не иметь поверхностных дефектов;
- иметь овальность не более 0,05 мм;
- соответствовать размерам, указанным на чертеже;
- не иметь полостей;
- содержание кислорода не должно превышать 0,007 масс. %.

Если электрод соответствует предъявляемым требованиям, то он отправляется в дальнейшее производство. В противном случае – бракуется.

2. Распыление жидкого сплава (металла)

Процесс получения гранул можно разделить на четыре стадии:

1. Плавление торца вращающейся заготовки;
2. Формирование жидкой капли на вращающемся торце;
3. Охлаждение капли при полёте в среде инертного газа;
4. Кристаллизация гранулы.

Для получения гранул используется технология центробежного распыления плазмой вращающегося электрода на установках УЦР-4.

После данных этапов мы получаем готовые гранулы разного фрикционного состава. Поэтому дальше осуществляется рассев гранул на рабочие фракции и их магнитная и электростатическая сепарации.

3. Рассев гранул, сепарация и очистка их от металлических и неметаллических включений

Самым основным и эффективным этапом для снижения металлических и керамических включений является рассев и сепарация гранул.

Металлические включения попадают в гранулы в результате изнашивания стальных барабанов во время плавки электрода в УЦР. Понизить их содержание позволяет установка электромагнитной сепарации.

Отделить рабочую фракцию гранул позволяет установка рассева, которая была модернизирована на ОАО «Композит», благодаря чему рассев и магнитная сепарация проходят на одной установке.

После гранулы, требуемого размера, подвергаются электростатической сепарации на установке СЭС, в процессе которой возможно извлечение до 95 % неметаллических включений.

4. Засыпка гранул и их герметизация в капсулах

В повышении качества гранул важную роль играет их засыпка в капсулы и герметизация на установке СНВ 6.12 (печь сопротивления нагрева вакуумная). На этом этапе для хорошего срачивания гранул в установке предусмотрена термическая дегазация гранул, осуществляемая посредством нагрева в высоком вакууме перед засыпкой в капсулы. Герметизация капсулы осуществляется путем электроннолучевой заварки ее приемного отверстия.

Этот процесс позволяет значительно понизить значение кислорода, соединений углерода, водорода, азота.

5. Газостатическая обработка

Следующим этапом является газостатическая обработка. Здесь заполненные капсулы гранулами подвергаются газостатическому уплотнению под действием высоких температуры (1100...1220 °С) и давления (до 200 Мпа).

Газостатическая обработка позволяет получать заготовки высокого качества. Полученный никелевый сплав ЭП741НП технологией гранульной металлургии, широко используется для получения дисков ГТД в авиа- и ракетостроении. Химический состав сплава и назначение каждого элемента представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сплава ЭП741НП и назначение каждого элемента

Элемент	Содержание, %	Назначение
Ni	51,26 - 59,38	основа
Co	15 - 16,5	Введение кобальта оказывает положительное влияние на жаропрочность и технологичность (ковкость). Это влияние особенно полезно, когда сплавы сильно легированы титаном, вольфрамом, молибденом, бором вместе с алюминием
Cr	8 - 10	Улучшает окалиностойкость и, кроме того, согласно данным П.Л. Грузина, повышает энергию связи атомов в твердом растворе системы Ni-Cr-Fe
W	5,2 – 5,9	Вольфрам, молибден, ниобий, рений и кремний при комплексном легировании вводят вместе с титаном или алюминием, т. к. эффект упрочнения получается более значительным, особенно в области высоких температур, нежели раздельное введение этих элементов. Вольфрам и молибден, присутствуя в твердом растворе, оказывают благоприятное влияние, повышая его термическую стойкость путем торможения процессов разупрочнения при высоких температурах. Они повышают температуру рекристаллизации твердого раствора. В присутствии бора и углерода вольфрам и молибден могут входить в состав упрочняющих фаз (боридов и карбонитридов)
Al	4,8 – 5,3	Оказывает очень сильное влияние на повышение жаропрочных свойств никелевых сплавов, причем тем больше, чем выше его содержание
Mo	3,5 – 4,2	Улучшение прочностных характеристик при высоких температурах
Nb	2,4 – 2,8	Способствует повышению термической стойкости твердого раствора, а при введении в достаточном количестве участвует в образовании интерметаллидной фазы типа Ni ₃ Nb или входит в состав γ'-фазы, а также состав карбидов. В сплавах с содержанием ниобия порядка 3-5% , обладает меньшей склонностью к трещинообразованию при сварке. Введение ниобия в сочетании с другими легирующими элементами сильно повышает пластичность сплавов при длительных испытаниях в горячем состоянии. Он также сильно измельчает зерно благодаря образованию карбидов и благоприятно действует на упрочнение приграничных объемов.

		Но при чрезмерно высоком комплексном легировании титаном, алюминием, молибденом, вольфрамом и другими элементами жаропрочность сплавов снижается, т. к. образуются первичные интерметаллидные фазы в виде грубых скоплений, вызывающих охрупчивание
Ti	1,6 - 2	Введение в сплавы 2,5-3,0 % Ti способствует образованию высокодисперсных интерметаллидных фаз при умеренных температурах, увеличивая тем самым сопротивление сплава пластической деформации и повышая 100-ч длительную прочность
Fe	до 0,5	В сложнелегированных жаропрочных сплавах введение железа несколько ухудшает жаропрочные свойства и содержание его не должно превышать 1-%
Si	до 0,5	Способствует повышению рабочей температуры
Mn	до 0,5	Положительно влияет на механические свойства и жаростойкость, уменьшает вредное влияние серы
C	0,02 – 0,06	Несмотря на малое содержание, углерод в жаропрочных никелевых сплавах оказывает большое влияние на их структуру и свойства, так как образует не только труднорастворимый карбид титана, но и карбиды хрома типа Cr ₂₃ C ₆ , Cr ₇ C ₃
Mg	до 0,02	Понижает вредное влияние серы
B	до 0,015	Бор сравнительно мало растворяется в гамма-твердом растворе при умеренных температурах и при старении выделяется в виде боридных фаз различного состава, преимущественно по границам и на стыках зерен. Максимальная жаропрочность вероятнее всего относится к максимальной растворимости бора в гамма-твердом растворе. Введение до 0,015% B не повышает кратковременной прочности и твердости, но увеличивает пластичность, определяемую при кратковременных и длительных испытаниях. Бор отрицательно влияет на окалиностойкость сплавов
Zr	до 0,015	Жаропрочные свойства сплавов на никелевой основе улучшаются, когда в них вводят малые добавки бора, щелочноземельных и редкоземельных элементов: кальция, бария, церия, бериллия и циркония. Добавки кальция, бария, циркония, бора и церия способствует измельчению частиц упрочняющей γ'-фазы. Также они повышают жаропрочность и пластичность сплава при рабочих температурах и деформируемость сплава в горячем состоянии
Se	до 0,015	
P	до 0,015	Оказывают вредное влияние на свойства сплава
S	до 0,009	

Для достижения требуемого комплекса свойств ($\sigma_b = 1290$ МПа, $\sigma_{0,2} = 865$ МПа, $\delta_5 = 9,8$ %, $\psi = 11,3$ %) необходимо выбрать соответствующий режим последующей термической обработки сплава.

6. Режим термической обработки

Для достижения необходимых свойств этот этап является определяющим. На ОАО «Композит» проведена термическая обработка по двум ступеням:

- первая ступень представляет собой нагрев сплава с шагом температуры 50 °С (табл. 2);
- вторая ступень – нагрев сплава с шагом температуры 10 °С (табл. 3).

Сравнивая результаты полученных экспериментальных данных, видно, что самым оптимальным является режим из второй ступени эксперимент 2 (рис. 1).

Как видно из графиков, самым лучшим режимом, обеспечивающим заданный комплекс свойств, является режим второй ступени эксперимент № 2 (рис. 2).

Анализ структурных исследований материала после проведения соответствующего режима на микроскопе марки «AxioVert A1» были получены следующие снимки структуры (рис. 3, 4).

Таблица 2. Свойства сплава ЭП741НП после ТО первой ступени

Режим ТО	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
Эксперимент №1: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1150 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.	1200	800	11	13
Эксперимент №2: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1200 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.	1280	850	10,5	12,3
Эксперимент №3: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1250 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.	1250	830	10,7	12,7

Таблица 3. Свойства сплава ЭП741НП после ТО второй ступени

Режим ТО	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
Эксперимент №1: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1200 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.	1260	820	10,4	11,3

<p>Эксперимент №2: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1210 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе</p>	1300	870	10,3	12
<p>Эксперимент №3: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1220 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.</p>	1280	840	10,5	11,5

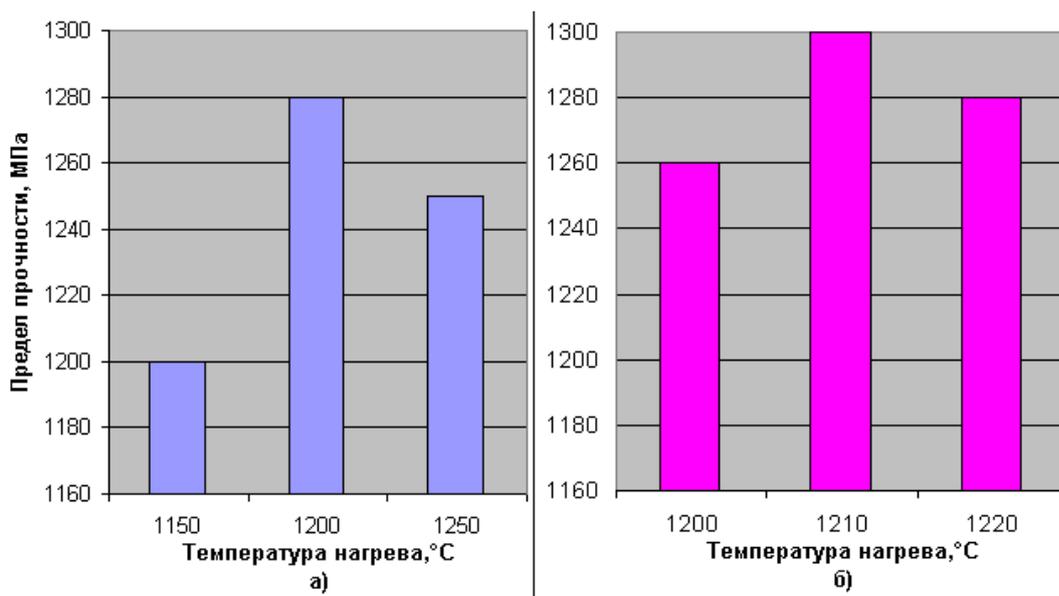


Рис. 1. Зависимость предела прочности от температуры нагрева: график зависимости предела прочности от температуры нагрева с шагом 50°С (а) и с шагом 10°С (б)

Термическая обработка никелевого сплава ЭП741НП

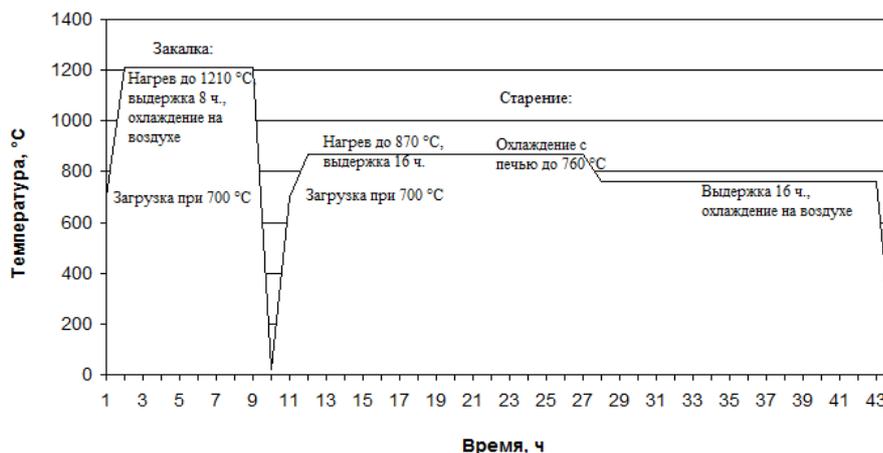


Рис. 2. Режим термической обработки никелевого сплава ЭП741НП

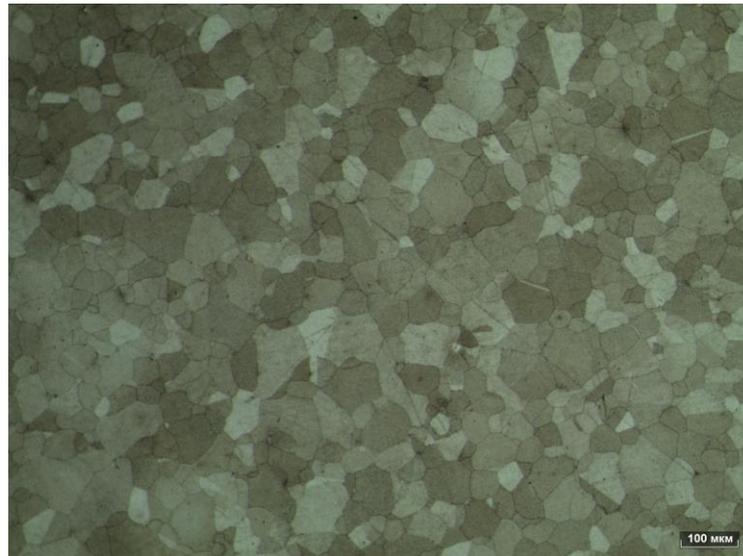


Рис. 3. Структура сплава ЭП741НП при увеличении x100

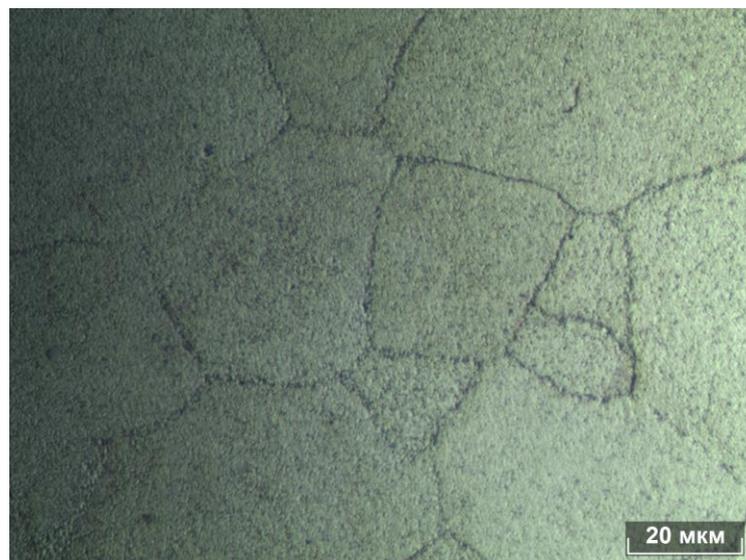


Рис. 4. Структура сплава ЭП741НП при увеличении x1000

После проведения ТО по указанному режиму мы получаем равноосную мелкозернистую структуру с четкими границами между зернами. Таким образом, в работе продемонстрировано обоснование выбора ТО для материала диска ГТД на основе никеля, полученного методом гранульной металлургии.

Литература

1. *Л.В.Тарасенко, М.В. Унчикова / Жаропрочные никелевые литейные сплавы равноосной и направленной кристаллизации - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э Баумана, 2005. - 18с.*
2. *Ф.Ф. Химушин. Жаропрочные стали и сплавы. - М.: Металлургия, 1969. - 752с.*
3. *Симс Ч.Т., Столофф Н.С. Хагель / Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок : изд. В 2-х т. / Под ред. Шалина Р.Е.-М.: Металлургия, 1995. - 384с.*
4. *А.Г. Берсенов, А.В. Логунов, А.И. Логачева / Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул // Вестник МАИ. 2008. №3. С.8.*
5. Robert W. Cahn and Peter Haasen / Physical Metallurgy – М.: 1996. - 942с.

6. *Фатхулин О.Х. и др.* / Разработка перспективных технологий для жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 1999. №3. С.53.
7. *Гарибов Г.С.* / Современный уровень развития порошковой металлургии жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2000. №6. С.58.
8. *Голованов В.И., Логачева А.И., Логунов А.В., Разумовский И.М.* / Тезисы доклада «Пути повышения качества гранулированных жаропрочных сплавов» // Материалы 25-й Международной научно – практической конференции «Композиционные материалы в промышленности». Ялта 2005. С.30.
9. *Мусиенко В.Т.* / Некоторые итоги разработки технологии производства гранул жаропрочных никелевых сплавов для изготовления изделий авиакосмической техники // Технология легких сплавов. 2000. №6. С.72.

УДК 621.789

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Ирина Артуровна Кельциева

Студент 4 курса

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: С. Ю. Шевченко⁽¹⁾, Л. В. Федорова⁽²⁾

⁽¹⁾ кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

⁽²⁾ доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение»

Современные предприятия тяжелого машиностроения сталкиваются с рядом существенных проблем: энерго- и ресурсосбережения, повышения ресурса и надежности машин, снижения трудоемкости изготовления и восстановления деталей, защиты окружающей среды, и др. В связи с этим необходимо внедрять в технологический процесс изготовления деталей современных термических, химико-термических, термомеханических и комбинированных способов повышения физико-механических свойств поверхностного слоя деталей. Основными дефектами при традиционных способах обработки (ТО, ХТО) деталей являются: коробление и деформация деталей, окисление и обезуглероживание поверхностного слоя, макро- и микротрещины, формирование остаточных растягивающих напряжений, хрупкость.

Ввиду вышеизложенного, особый интерес представляют собой методы обработки высококонцентрированными источниками энергии, преимуществами которых являются: простота технологии, относительно низкая себестоимость и экологическая чистота процесса. В данной работе рассматривались два метода обработки:

- импульсная плазменная обработка (ИПО)
- электромеханическая обработка (ЭМО)

Процесс плазменной термообработки отличается подводом энергии с поверхности и распространением ее во внутренние слои металла за счет теплопроводности. При этом микрообъемы, находящиеся на разном расстоянии от поверхности, нагреваются до разных температур, причем скорости нагрева и охлаждения этих микрообъемов тоже разные. Параметры импульсно-плазменной обработки могут составлять: температура около 15000 К, времени воздействия одного импульса порядка 100 мкс, давление $P=100...500$ атм., примерная скорость охлаждения $V_{охл}=10^6...10^7$ °С/с. Особенность термического цикла плазменной закалки

– отсутствие выдержки при постоянной температуре, вслед за подъемом температуры следует немедленное охлаждение [1]. Преимуществами данной обработки являются высокая производительность, простота технологии, относительно низкая себестоимость, экологическая чистота процесса, возможность обработки деталей различной конфигурации и габаритов.

Электромеханическое упрочнение основано на сочетании термического и силового воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали. Сущность этого способа заключается в том, что в процессе обработки через место контакта инструмента с изделием проходит ток большой силы и низкого напряжения, вследствие чего поверхностный слой металла упрочняется. К особенностям теплообразования и термических процессов следует отнести: наличие двух основных источников тепла, создаваемых электрическим током и трением; локальный нагрев, сопровождающийся действием значительных давлений; термический цикл весьма кратковременный и измеряется долями секунды; высокая скорость охлаждения определяется интенсивным отводом теплоты внутрь детали. Эти особенности обуславливают получение особой мелкодисперсной и твердой структуры поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами [2].

В работе рассматривали влияние ИПО и ЭМО на структуру, а также твердость поверхности углеродистых сталей 30, 35, 45, 55ПП, У8.

Для генерации потоков плазмы использовался импульсный плазмотрон на основе сильноточного разряда магнитоплазменного компрессора в воздухе. Параметры импульсно-плазменной обработки для данных образцов: запасаемая в конденсаторах энергия 13,5 кДж ($U_0=3\text{кВ}$), плотность радиационных потоков до 330 кВт/см^2 (температура ударно сжатой плазмы на поверхности $\sim 15\text{ кК}$, давление плазмы $\sim 150\text{ бар}$), плотность энергии до 40 Дж/см^2 ; характерное время воздействия – $120\pm 10\text{ мкс}$. Диаметр зоны, модифицированной плазмой за один импульс облучения, близок к диаметру наружного электрода (анода) плазмотрона и составляет $\sim 40\text{...}50\text{ мм}$, электрод – вольфрамовый. Режим обработки на протяжении всего эксперимента не менялся.

Микроструктуру сталей исследовали на оптическом микроскопе Olympus GX51 после травления 4%-ным раствором азотной кислоты.

На рисунке 1 представлены структуры поперечных срезов образцов сталей 30, 45, У8 после ИПО.

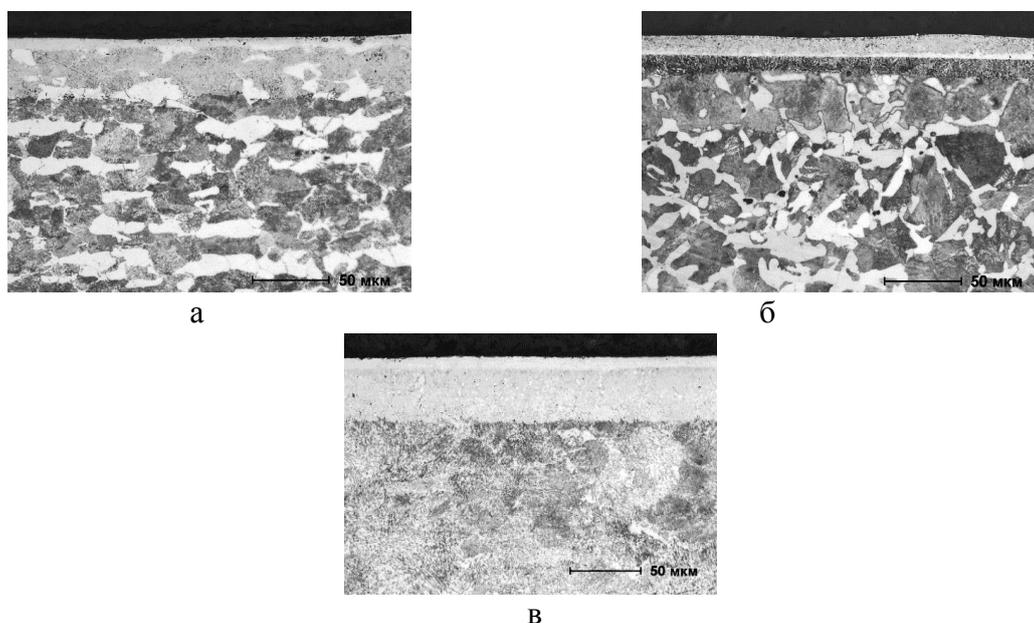


Рис. 1. Микроструктура образцов после ИПО: а – стали 30, б – стали 45, в – У8

Поверхностно-упрочненный слой состоит из двух зон термического влияния. Толщина первой зоны термического влияния составила: для стали 30 – около 10 мкм, для сталей 45 и У8 – около 20 мкм. Толщина второй зоны для сталей 30, 45 и У8 – около 30 мкм. В первой зоне прошла полная закалка, она характеризуется однородной структурой, вторая зона подверглась неполной закалке, в результате чего часть элементов структуры осталась без изменений (зерна феррита в сталях 30, 45).

На рисунке 2 (а-в) представлено распределение твердости по толщине слоя для сталей 30, 45 и У8.

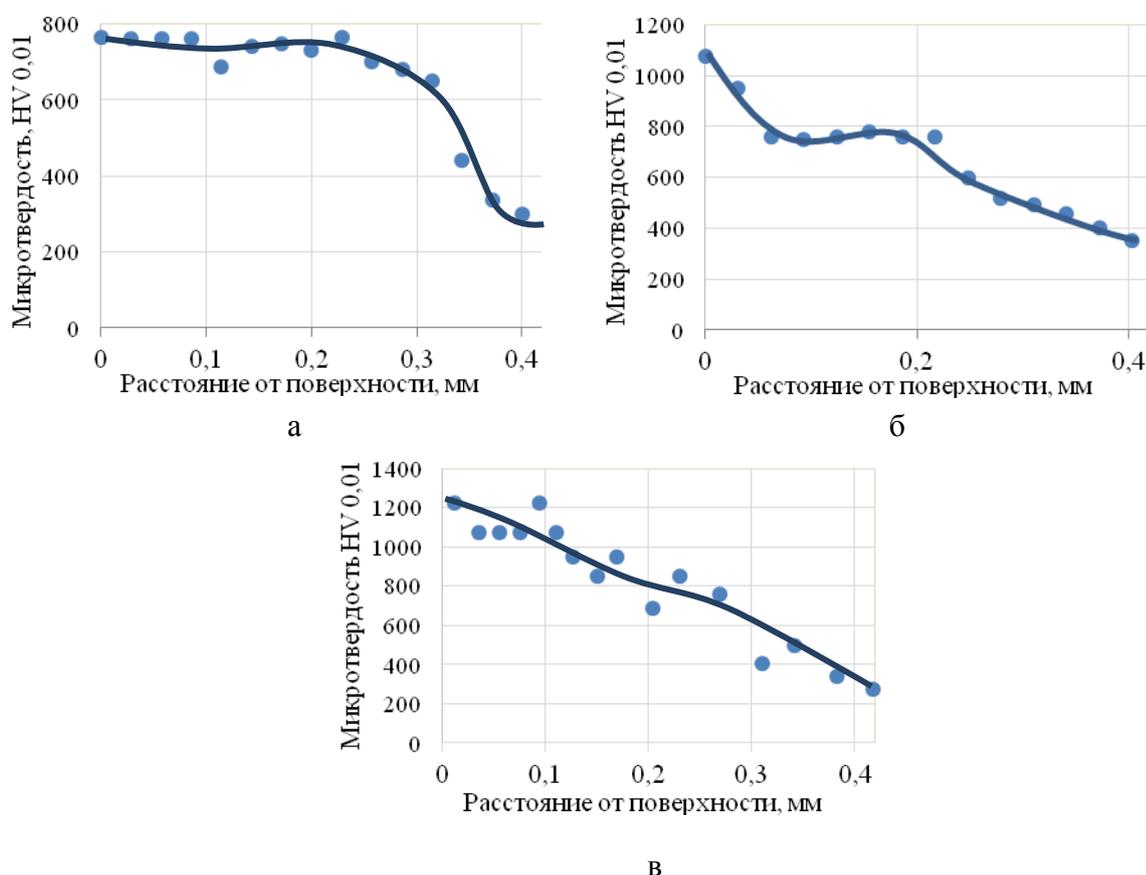


Рис.2. Распределение микротвердости образцов после ИПО сталей марок: а – стали 30, б- стали 45, в – У8

В процессе плазменного воздействия формируется большое количество дефектов кристаллического строения. Косвенно это наблюдение подтверждается высокими значениями твердости модифицированной поверхности образцов: для стали 30 – при микротвердости сердцевины 180 HV твердость обработанной плазменным потоком поверхности 780 HV, для стали 45 – микротвердость сердцевины 190 HV твердость обработанной плазменным потоком поверхности 1000 HV, для У8 – микротвердость сердцевины 220 HV, твердость обработанной плазменным потоком поверхности 1200 HV. Для сравнения, твердость стали 30 после закалки при 860 °С с последующим охлаждением в воде, составляет не более 200 HV, стали 45 после закалки при 840°С с последующим охлаждением в воде – не более 234 HV.

Электромеханическая обработка проводилась на токарном винторезном станке 1В62Г при следующих режимах: резьбовая подача станка 2 мм/об на длину 10-11 мм, сила тока во вторичной цепи 400-800 А, напряжение 1,5-3 В, усилие прижатия ролика 500 Н и частота вращения 10 об/мин.

На рисунке 3 представлены микроструктуры поперечных срезов образцов сталей 35, 55ПШ и У8.

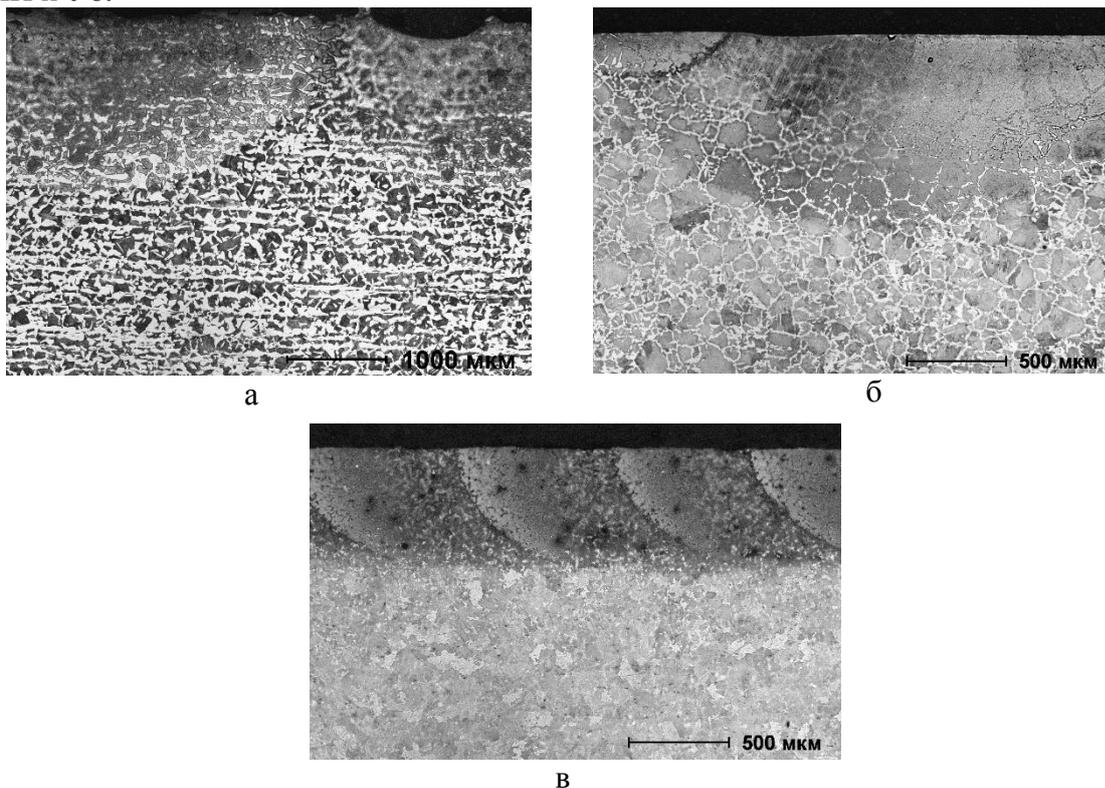
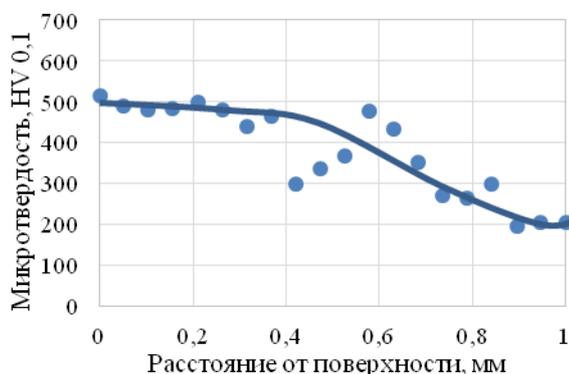


Рис.3. Микроструктуры образцов после ЭМО сталей марок: а – стали 35, б – 55ПШ, в – У8

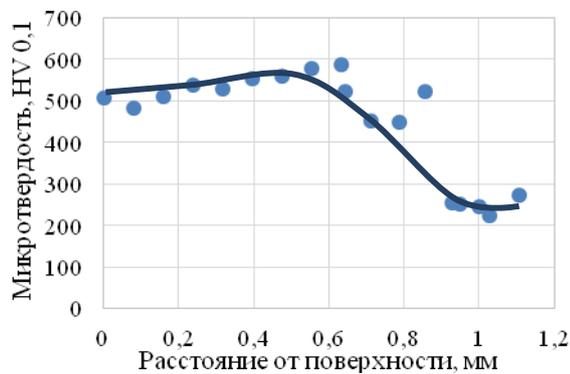
Толщина упрочненного слоя составила: для стали 35 – 1,8 мм, для 55ПШ – 0,9 мм, для У8 – 0,56 мм. На поверхности сталей 55ПШ и У8 образуется однородная мелкодисперсная структура мартенсита, которая почти не наблюдается в стали 35. В зоне термического влияния сталей 35 и 55ПШ получается ферритно-мартенситная структура, которая образуется в результате неполной закалки.

На рисунке 4 (а-в) представлено распределение твердости по толщине слоя для сталей 30, 55ПШ и У8.

Наблюдается увеличение микротвердости поверхности в 2-2,5 раза.



а



б

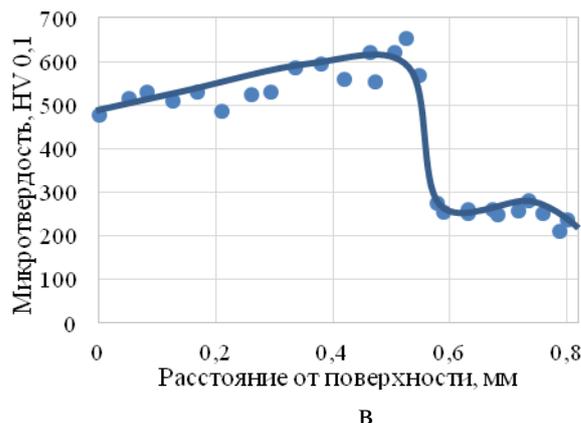


Рис. 4. Распределение микротвердости образцов после ЭМО: а – стали 35, б – 55ПП, в – У8

Вывод

Проведено сравнение микроструктуры и механических свойств углеродистых сталей после импульсной плазменной обработки (ИПО) и электромеханической обработки (ЭМО). Установлено, что толщина поверхностно-упрочненного слоя образцов после ЭМО в 10 раз больше. Измерение механических свойств показало, что твердость поверхности исследуемых образцов после ИПО в 1,5-2 раза превышает значение твердости образцов после ЭМО.

Литература

1. Петров С.В., Сааков А.Г. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. – К.: ТОПАС, 2000. – 220 с.
2. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей машин ЭМО. 3-е изд., перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1989. – 197 с.

УДК 621.785.4

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ НА ТВЕРДОСТЬ И СТРУКТУРУ СТАЛИ 30ХГСА

Анастасия Андреевна Красуля⁽¹⁾, Никита Евгеньевич Шкляр⁽²⁾

Студентка 5 курса

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Аспирант

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.И. Гришин

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Представлено исследование по сравнительной оценке традиционной (закалка 880 °С + отпуск 540 °С) и изотермической закалке (закалка 880 °С + изотермический отпуск при 375 °С и 400 °С с разной изотермической выдержкой) на твердость и структуру стали 30ХГСА. Показано преимущество изотермической закалки по уровню механической свойств и экономическим показателям.

Ключевые слова: изотермическая обработка, бескарбидный бейнит, твердость.

Введение

В настоящее время существует проблема повышения прочности и ударной вязкости для ответственных деталей в узлах самолетов и вертолетов.

Решений это проблемы несколько:

- выбор более дорогостоящей марки материала, из которого будет изготавливаться ответственная деталь;
- выбор рационального режима термической обработки для используемых марок сталей, для повышения пластических и прочностных свойств.

Если выбирать первый вариант, существенно увеличится стоимость производства таких деталей, что совершенно нецелесообразно. Выбрав второй вариант, была предложена другая термическая обработка стали 30ХГСА (хромансиль), состоящая из изотермической закалки при температуре 880 °С и выдержкой при температуре 375 °С или 400 °С и различным временем. Режимы для изотермической закалки подбирались на основании данных работы [2], где показана возможность получения структуры бескарбидного бейнита на сталях 30ХГСА, 60С2,9ХС. Отсутствие большого количества карбидов в структуре бескарбидного бейнита обеспечивает повышенную ударную вязкость при высокой твердости.

В авиации широко используется сталь 30ХГСА для деталей, используемых в узлах, подверженных высоким нагрузкам и неблагоприятным условиям: крепежные детали, детали, работающие при низких температурах, в сварных конструкциях, испытывающих знакопеременные нагрузки и т.д.

Помимо упомянутых выше авиационных деталей, в машиностроении этот материал используется для лопаток компрессорных машин, эксплуатируемых при температуре до 400 °С, различных валов, осей, деталей обшивки и многое другое.

Сортамент выпускаемой из стали 30ХГСА продукции охватывает различные виды проката, листа, поковок, штамповок и труб.

Сталь 30ХГСА отличается хорошей свариваемостью и стоит сравнительно недорого, так как не содержит дефицитных легирующих элементов.

Цель работы

Сравнить традиционную термическую обработки стали 30ХГСА и изотермическую закалку. Получить комплекс механических свойств, включающий в себя высокую твердость (40HRC) и повышенную, по сравнению с традиционным способом термообработки, ударную вязкость. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Отработать режим термической обработки для получения структуры бескарбидного бейнита.
2. Провести металлографические и дюрOMETрические исследования образцов.

Материалы и методики

Сталь 30ХГСА

Объекты исследований изготавливали из стали ферритного класса 30ХГСА (хромансиль), состав которой приведен в табл. 1. Сталь 30ХГСА содержит в качестве легирующих элементов: кремний, марганец, хром (в количестве примерно одного процента), при этом содержание углерода в 30ХГСА равно ~ 0,30 %, а серы и фосфора – не более 0,025 %.

Таблица 1. Химический состав стали 30ХГСА

Сталь	Химический состав, %							
	C	Si	Mn	Ni	Mo	Al	Cu	Cr
30ХГСА	0,32	1,06	0,87	0,06	0,005	0,026	0,16	0,92

Традиционная термическая обработка производилась в камерной печи фирмы Durferit и состояла из нагрева под закалку при температуре 880 °С с выдержкой 5 минут и отпуска при температуре 540 °С 2 часа в печи-ванне той же фирмы.

Нагрев под изотермическую закалку стали проводили при температуре 880 °С в соляной ванне, изотермическую выдержку проводили в селитровой ванне при температуре 375 °С и 400 °С (время выдержки 10,15 и 20 мин.).

Оборудование для нагрева под закалку и изотермической выдержки показаны на рис.1 и 2 соответственно.



Рис.1. Печь-ванна для нагрева под закалку образцов из стали 30ХГСА



Рис.2. Печь-ванна для изотермической выдержки в расплаве селитры

Чтобы обеспечить требуемую твердость и структуру, необходимо было установить время и температуру выдержки для получения оптимальной твердости и пластичности образцов из стали 30ХГСА.

Сравнение традиционной обработки и изотермической закалки стали 30ХГСА

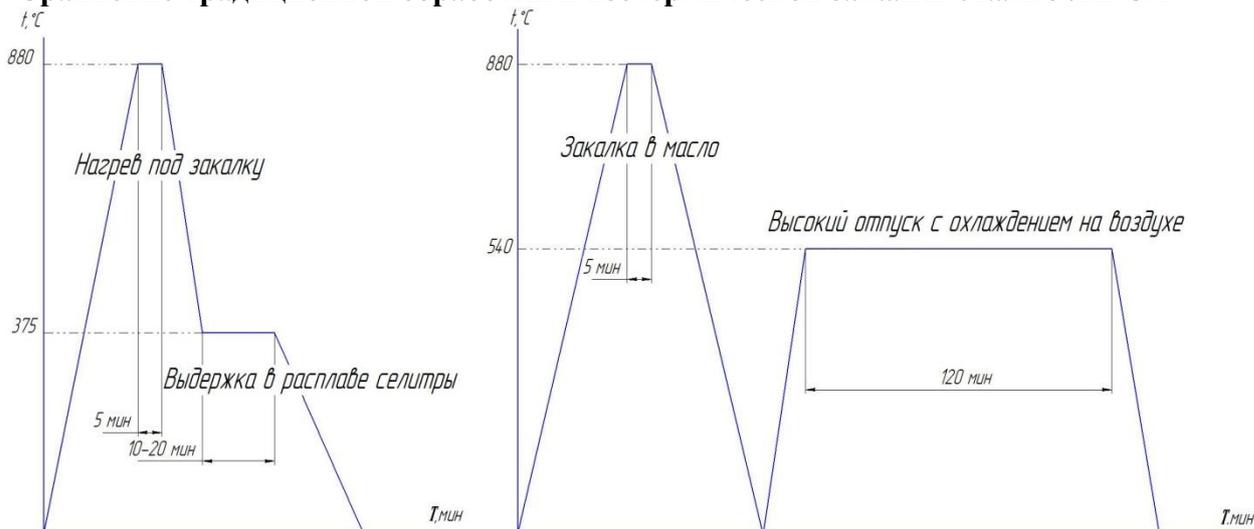


Рис.3. Сравнение способов проведения термической обработки стали 30ХГСА

Бейнитное превращение является промежуточным между перлитным и мартенситным. Время выдержки в горячей среде должно быть больше времени изотермического превращения аустенита, и его можно ориентировочно выбрать, руководствуясь С-диаграммой. При одинаковой твердости вязкость нижнего бейнита больше, чем у стали, отпущенной после закалки на мартенсит. Одной из причин получения высокой вязкости это более однородное распределение карбидных частиц в бейните. При бейнитном превращении сохраняется большое количество остаточного аустенита [3], который не превращается в мартенсит при охлаждении после изотермической выдержки.

Изотермическая закалка обеспечивает высокую ударную вязкость, резко уменьшает чувствительность к надрезу и деформациям по сравнению с закаленной на мартенсит и отпущенной сталью. Следовательно, изотермическая закалка позволяет повысить конструктивную прочность стали.

В результате бейнитного превращения образуется смесь α -фазы (феррита) и карбида, которая называется бейнитом. Карбид в бейните не имеет пластинчатого строения, свойственного перлиту. Карбидные частицы в бейните очень дисперсны, и их можно обнаружить только под электронным микроскопом.

Различают «верхний» и «нижний» бейнит, образующиеся соответственно в верхней и нижней части промежуточного интервала температур. Верхний бейнит имеет перистое строение, а нижний — игольчатое, мартенситоподобное. Нижний бейнит по виду микроструктуры бывает трудно отличить от отпущенного мартенсита. Указанные микроструктурные особенности, связанные с формой кристаллов феррита, не обязательны для бейнита во всех сталях. При традиционной закалке в стали присутствуют структурные напряжения из-за полиморфного превращения и термические напряжения из-за перепада температур, которые в меньшей мере присутствуют в большом количестве при изотермической закалке. Также существенное различие двух термических обработок во времени проведения процесса, при традиционной обработке время процесса составляет более двух часов, так при изотермической закалке всего 25 минут.

Авторами работ [1 - 3] была проведена отработка режимов по получению структуры верхнего бейнита. Сделан вывод о невозможности получения бескарбидного бейнита при непрерывном охлаждении и образования этой структуры при изотермической выдержке в бейнитном интервале температур. По результатам этих исследований были предложены режимы термообработки и исследованы свойства образцов.

Методика исследования

Исследовали образцы после изотермической выдержки при температурах 375 °С и 400 °С и с временем выдержки 10, 15 и 20 мин и образцы после термической обработки состоящей из закалки и высокого отпуска.

Металлографические исследования проводили на микроскопе Olympus GX-51 при увеличениях $\times 500$. Микрошлифы изготавливали по традиционной методике. Для выявления микроструктуры образца используют травители. Травление проводилось в 3-4 % растворе HNO_3 этилового спирта. Затем шлиф быстро промывают водой и высушивают фильтровальной бумагой.

ДюрOMETрические исследования состояли в измерении твердости поверхности образцов по методу Роквелла на приборе TP5006-02 при нагрузке 150 кг и в измерение микротвердости на приборе DuraScan при нагрузке 0,1 кг.

Результаты исследований

Микроструктура и свойства стали 30ХГСА после изотермической закалки

Исследовали микроструктуру стали после изотермической закалки при 375 °С и 400 °С в течение 10, 15 и 20 мин (рис. 4 - 9).

После выдержки 10 минут и при 400 °С (рис. 7) можно увидеть двухфазную область, участки сохранившегося после охлаждения аустенита и мелкие пластины бейнитного феррита. Увеличение времени выдержки до 20 мин характеризуется появлением контраста между областями аустенита, находящимся рядом с карбидами и на некотором расстоянии от карбидов. Вероятно, это объясняется обеднением более светлых областей (бескарбидный бейнит) по углероду, что объясняет падение твердости образцов.

При температуре выдержки 375 °С к 10 минуте заканчивается первая фаза бейнитного превращения, проходящая по бескарбидному механизму, то есть сдвиговое γ - α превращение с предварительным диффузионным перераспределением атомов углерода, но без образования карбидной фазы. Последующие 10 мин выдержки являются инкубационным периодом для процессов карбидообразования.

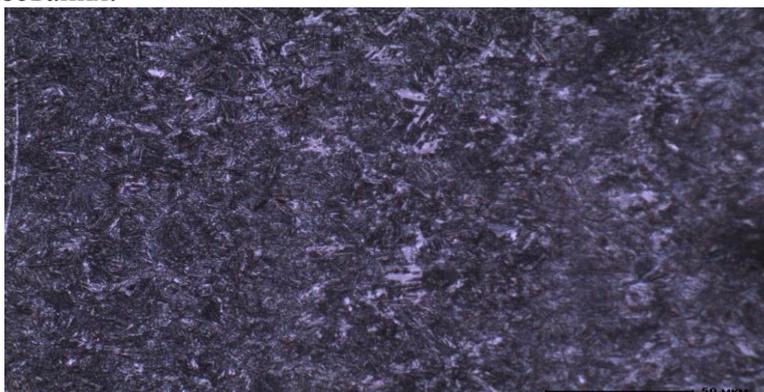


Рис. 4. Микроструктура стали 30ХГСА после закалки с изотермической выдержкой при температуре 375 °С в течение 10 мин. $\times 500$

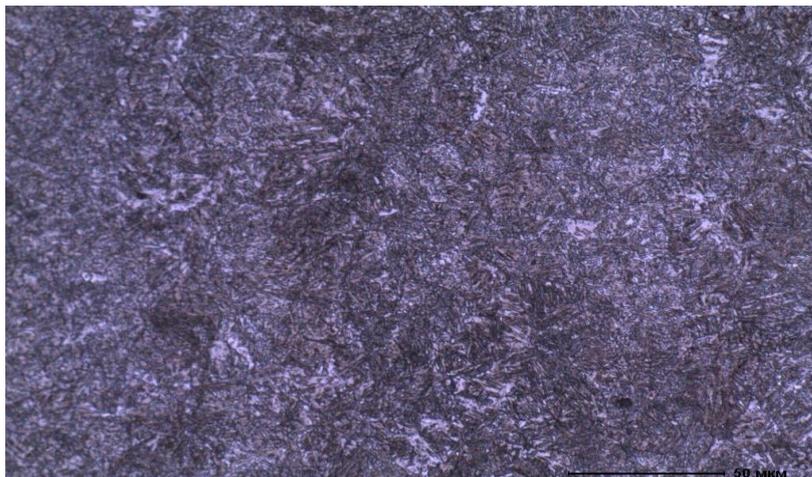


Рис. 5. Микроструктура стали 30ХГСА после закалки с изотермической выдержкой при температуре 375 °С в течение 15 мин. х 500

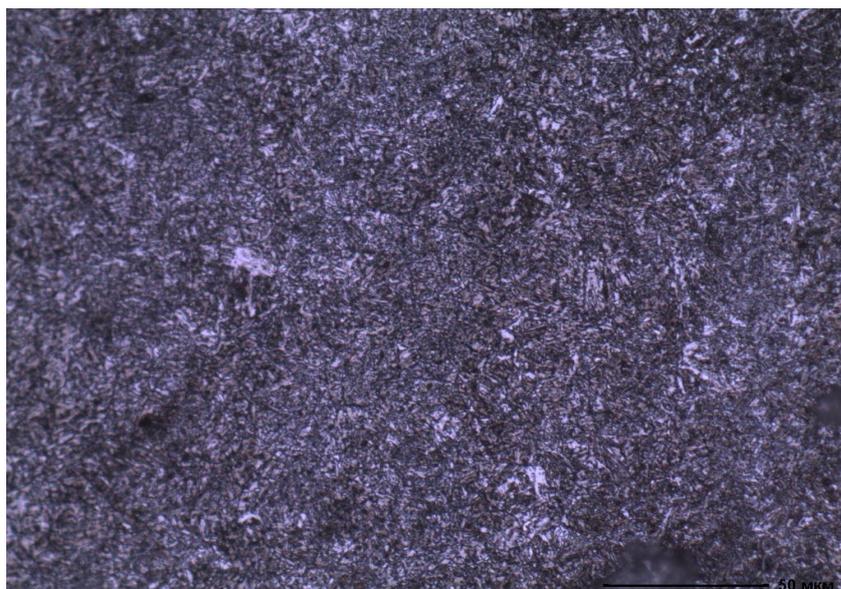


Рис. 6. Микроструктура стали 30ХГСА после закалки с изотермической выдержкой при температуре 375 °С в течение 20 мин. х 500

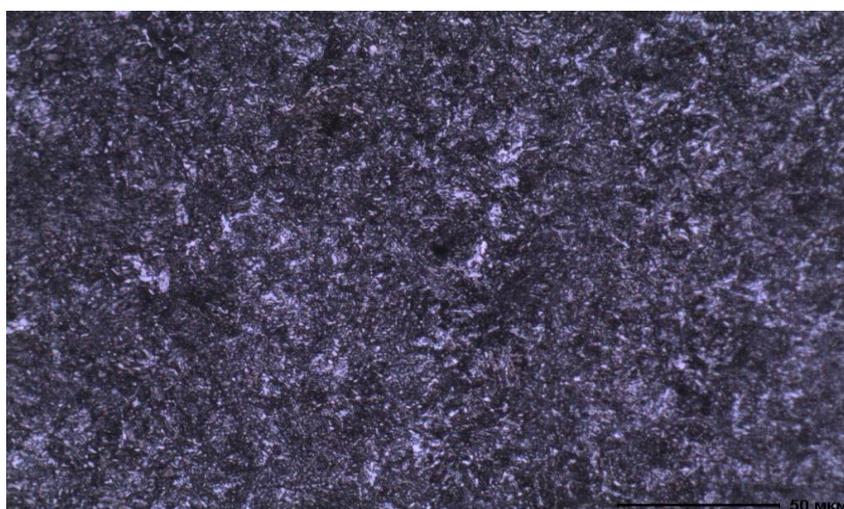


Рис. 7. Микроструктура стали 30ХГСА после закалки с изотермической выдержкой при температуре 400 °С в течение 10 мин. х 500

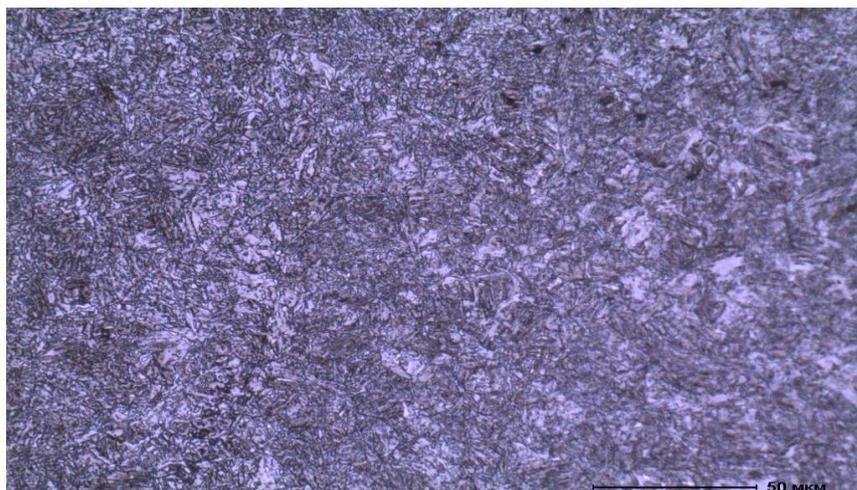


Рис. 8. Микроструктура стали 30ХГСА после закалки с изотермической выдержкой при температуре 400 °С течение 15 мин. х 500

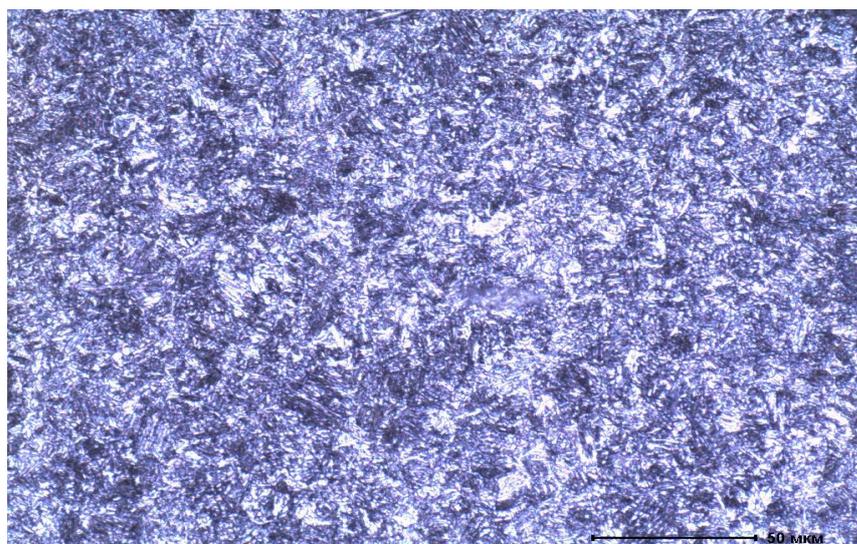


Рис. 9. Микроструктура стали 30ХГСА после закалки с изотермической выдержкой при температуре 400 °С в течение 20 мин. х 500

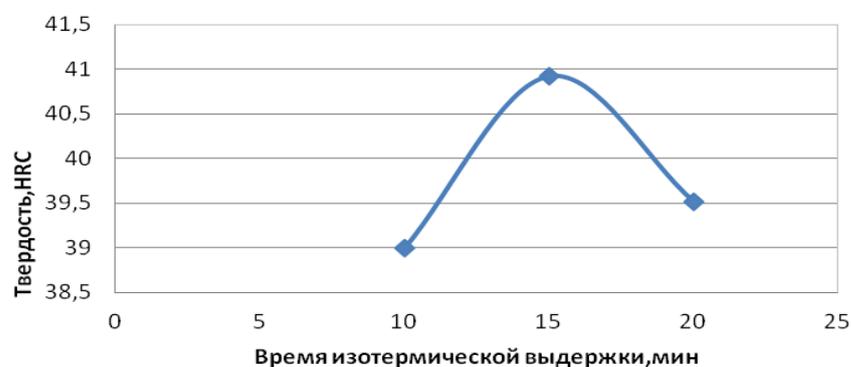


Рис.10. Твердость стали 30ХГСА с температурой изотермической выдержки 375 °С

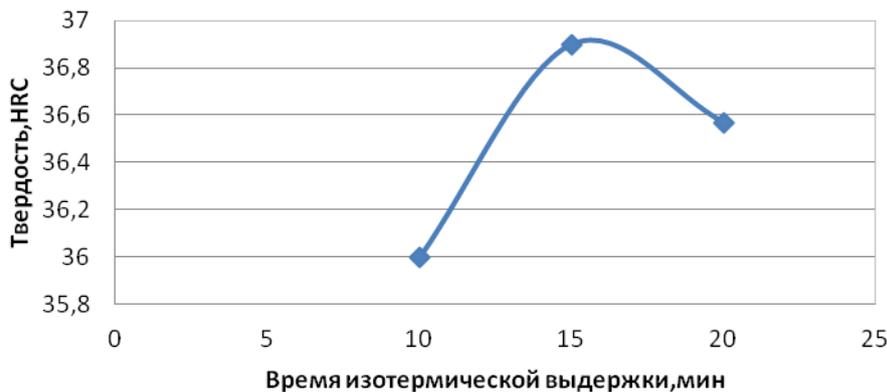


Рис.11. Твердость стали 30ХГСА с температурой изотермической выдержки 400 °С

При температуре 400 °С после выдержки в 10 мин количество аустенита падает, уровень твердости практически постояен (36 HRC) , твердость не меняется вследствие того, что сдвиговое превращение аустенита с образованием высокодисперсной α -фазы компенсирует уменьшение твердости , связанное с отпускными процессами.

Твердость, полученная после традиционной термической обработки 31-33 HRC, а после изотермической закалки 40-41 HRC.

Выводы

1. Установлено существенное различие в твердости стали 30ХГСА после улучшения (закалка +высокий отпуск) и изотермической закалки.
2. Твердость после улучшения 33 HRC, а после изотермической закалки 41HRC.
3. Показана возможность получения на стали 30ХГСА структуры бескарбидного бейнита. Для обоснования рационального режима изотермической закалки, требуется проведение дальнейших исследований структуры и фазового состава стали во взаимосвязи с уровнем полученных механических свойств.
4. Применение изотермической закалки позволяет существенно сократить технологический цикл термической обработки.

Литература

1. Леонтьев П.А., Симонов Ю.Н., Иванова А.С. Исследование фазовых превращений и структуры кремнистых сталей с различным содержанием углерода при непрерывном охлаждении // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2013. - Т.15. - № 4. - С.33-39.
2. Леонтьев П.А., Симонов Ю.Н., Иванова А.С. Исследование фазовых превращений и структуры кремнистых сталей с различным содержанием углерода при изотермической обработке в диапазоне температур с низкой диффузионной подвижностью атомов железа // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2014. - Т.16 - № 1. - С.16-22.
3. Леонтьев П.А., Симонов Ю.Н., Иванова А.С. Влияние режима изотермической закалки на долю остаточного аустенита и твердость стали 30ХГСА // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2014.
4. Бернштейн М.Л., Рахитадт А.Г., Металловедение и термическая обработка стали. Справочник. - Т. 2. – С. 1173-1176.
5. Попов А.А., Попова А.Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлаждения аустенита. Урало-Сибирское отделение МАШГИЗа, 1961. – С. 208-210.

УДК 620.1**ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В АВИАСТРОЕНИИ**

Виктория Александровна Крохина

Студентка 4 курса

Кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Н.А. Ночовная

доктор технических наук, начальник лаборатории титановых сплавов ГНЦ ФГУП «ВИАМ»

Введение

Сплавы на основе титана стали одними из важнейших конструкционных материалов. Их применение наиболее целесообразно в тех областях техники, где необходимо сочетание высокой удельной прочности и коррозионной стойкости: судостроении, авиации, химической промышленности и т.д. Специфика применения титановых сплавов в последние десятилетия состоит во все более широком использовании их в различных конструкциях, в том числе упругих элементов, что приводит к увеличению как объемов производства, так и сортамента полуфабрикатов и изделий.

Изученные к настоящему времени фазовые превращения в сплавах титана бесспорно лежат в основе технологии их механической и термической обработки, но приходится признать, что производство конкретных полуфабрикатов и изделий постоянно требует и будет требовать исследования и детализации закономерностей превращений. Структура и свойства сплава, а также различные виды термомеханической обработки могут оказать решающее влияние на возможности, например, окончательной упрочняющей обработки.

Ответственные сферы применения этих сплавов требуют дальнейшего повышения их эксплуатационных свойств за счет разработки новых режимов термической и термомеханической обработок, позволяющих получить уровень прочности в изделиях до 1400 МПа при удовлетворительных пластических и вязкостных характеристиках. К одним из наиболее перспективных титановых сплавов для данных целей следует отнести высокопрочный сплав ($\alpha+\beta$) - класса - BT23M.

Легирование титановых сплавов

Легирующие элементы оказывают различное влияние на температуру полиморфного превращения титана. Созданные на основе систем Ti – Al – V и Ti – Al – Mo или на их комбинации промышленные сплавы отличаются высокой термической стабильностью, поскольку ванадий и молибден являются изоморфными β – стабилизаторами, не образующими с титаном химических соединений и не приводящими к эвтектоидным реакциям.

На рисунке 1 представлена классификация легирующих элементов на группы в зависимости от их действия.

Изменение содержания α - стабилизаторов и нейтральных упрочнителей не принимается во внимание при определении принадлежности сплавов к тому или другому классу. Эта классификация наиболее приемлема для оценки возможностей термической и термомеханической обработок титановых сплавов.

К нулевому классу относятся сплавы с α -структурой, в которых отсутствует β -стабилизаторы. К этому классу относятся три марки технического титана: BT1-00, BT1-0, BT1 и сплавы, легированные алюминием и оловом: BT5 (Ti + 5 % Al) и BT5-1 (Ti + 5 % Al + 2,5 % Sn). Алюминий эффективно повышает прочностные характеристики, одновременно снижая

пластичность. Его содержание в промышленных сплавах ограничивается 7%, так как дальнейшее увеличение алюминия ведет к охрупчиванию сплава.

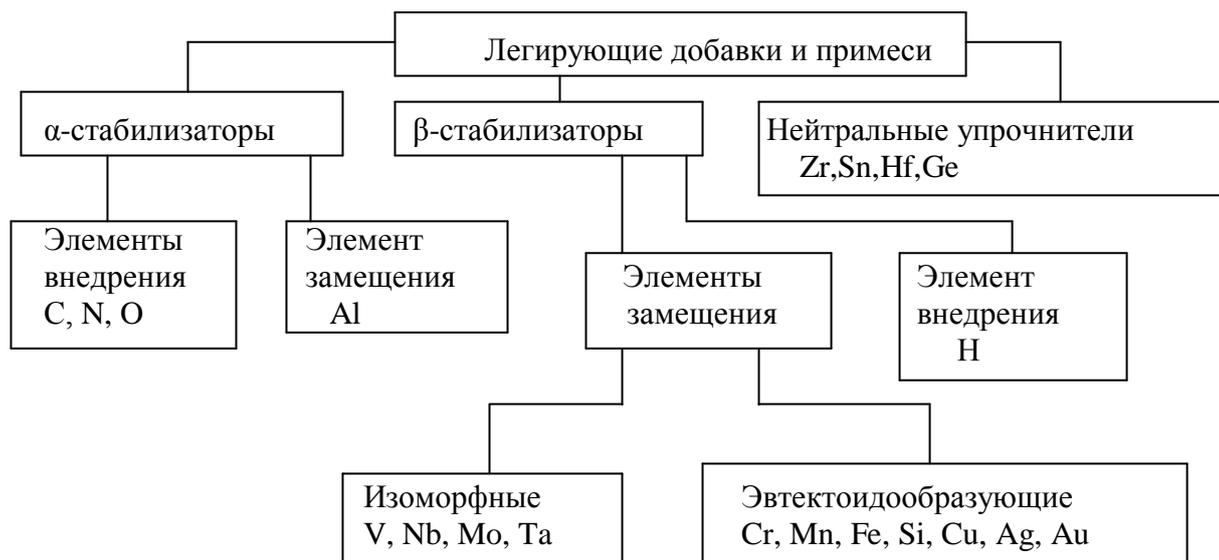


Рис. 1. Схема деления легирующих элементов и примесей на группы

К первому классу относятся малолегированные $\alpha+\beta$ - сплавы мартенситного типа (псевдо α - сплавы). В них наряду с алюминием есть небольшое количество элементов, стабилизирующих β -фазу, в пределах, близких к растворимости в α -титане. К этому классу сплавов относятся сплавы OT4-0, OT4-1, OT4, BT4, содержащие от 1 до 5 % Al и 0,8-2,0 % Mn, и сплав BT20 (6 % Al + 2 % Zr + 1 % Mo + 1 % V). Благодаря такому легированию получают предел прочности от 500 до 950 МПа.

Ко второму классу относятся среднелегированные $\alpha+\beta$ - сплавы мартенситного типа: BT6C, BT6, BT14, BT23, BT23M (конструкционные) и BT3-1, BT8, BT9 (жаропрочные). Эти сплавы закаливают с температуры β -области на α' -фазу. В наиболее прочном свариваемом сплаве BT23 применено комплексное легирование четырьмя β - стабилизаторами при использовании более дешевых легирующих элементов - хром и железо.

К третьему классу относятся высоколегированные $\alpha+\beta$ - сплавы мартенситного типа. К этому классу сплавов может быть отнесен сплав BT16 и другие сплавы, закаливаемые с температуры β - области на α'' - фазу.

В целом стоит отметить, что $\alpha+\beta$ - титановые сплавы характеризуются большим разнообразием и сложностью фазовых превращений.

Среди высокопрочных титановых сплавов следует выделить высокопрочные и высокопластичные β - сплавы, представленные на диаграмме титан - β -стабилизаторы. Эти β - сплавы имеют пониженное количество алюминия, что обеспечивает им высокую пластичность (рисунок 2).

К четвертому классу относятся малолегированные β - сплавы: BT22, BT30 и BT19. При закалке с температуры β - области в этих сплавах фиксируется 100 % механически и термически нестабильной β - фазы.

К пятому классу относятся среднелегированные β - сплавы, содержащие термически нестабильную β - фазу. К этому классу сплавов относятся сплавы: BT15, ИВТ1, ТС6, а также американский сплав В-120VCA.

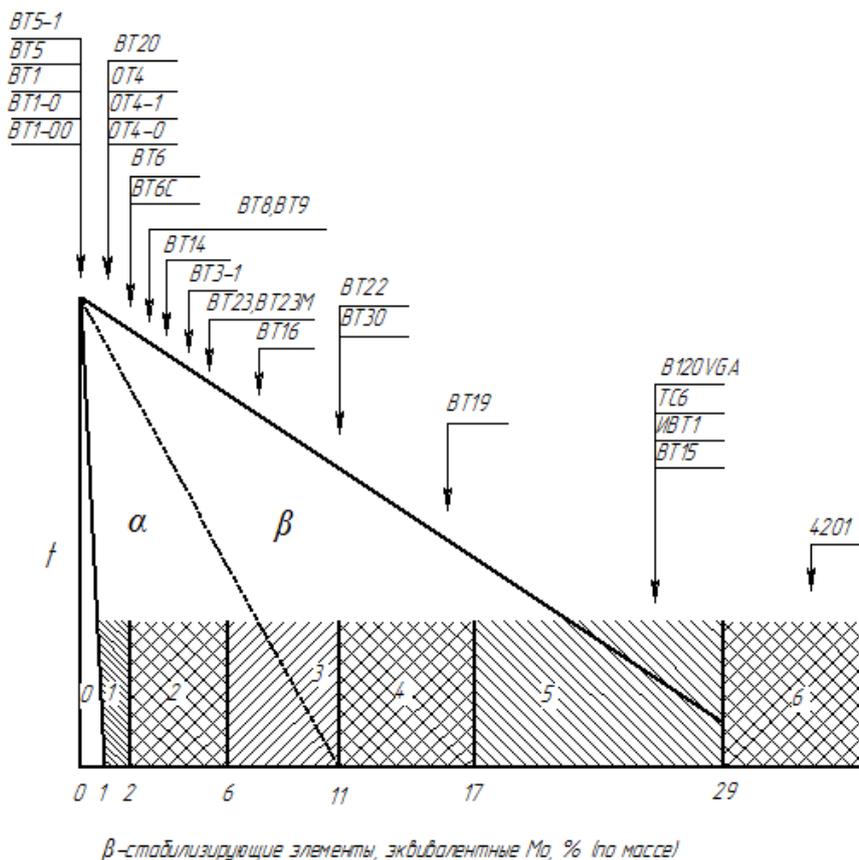


Рис. 2. Классификация титановых сплавов: 0 - 6- классы сплавов

К шестому классу высоколегированные β - сплавы, содержащие практически стабильную β-фазу. К этому классу сплавов относится сплав 4201(с 32 % Mo).

В средне- и высоколегированных сплавах мартенситного типа упрочняющая термообработка приводит к повышению твердости. Наряду с распавшейся β - фазой, преобладающей в структуре этих сплавов, остается мартенситная игольчатая фаза.

Преимуществами α+β- сплавов по сравнению с β - сплавами являются: меньшее содержание в них дорогостоящих и дефицитных легирующих элементов, что снижает стоимость сплава; меньшая плотность и меньшая энергоёмкость при получении и термообработке полуфабрикатов и деталей. В общем виде принадлежность титановых сплавов к определенному классу представлена на рисунке 2.

Высокопрочные титановые сплавы

По особенностям механических и технологических свойств титановые сплавы могут быть разделены на три группы:

- высокопластичные (термически неупрочняемые) конструкционные сплавы;
- высокопрочные (термически упрочняемые) конструкционные сплавы;
- жаропрочные сплавы.

При создании сложных конструкций из высокопрочных титановых сплавов механические соединения заменяют сварными. В этом случае используют автоматическую аргоно-дуговую и электронно-лучевую сварку и сварку в обитаемой камере.

На диаграмме Ti - β-стабилизаторы (рисунок 2) представлен ряд широко применяемых высокопрочных отечественных титановых сплавов с (α+β) структурой. Их свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики высокопрочных конструкционных титановых сплавов с ($\alpha+\beta$) структурой

Сплав	Композиция легирования (содержание элементов, % по массе)	σ_b , МПа	Максимальная температура применения, °С	Тип полуфабриката
BT6	Ti-6Al-4V	900-950	350	Листы, плиты, прутки, поковки, штамповки
BT16	Ti-3Al-5Mo-5V	1000-1050	300	Прутки
BT22	Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe	≥ 1080	350	Крупногабаритные штамповки и поковки
BT23	Ti-5,5Al-2Mo-4,5V-1Cr-0,6Fe	≥ 1100	350	Листы, лента, фольга, плиты, прутки, поковки, штамповки, трубы, профили
BT23M	Ti-5,4Al-1,9Mo-4,2V-1Cr-0,4Fe	≥ 1150	350	Аналогичны сплаву BT23

Универсальный титановый сплав BT6 рекомендуется для деталей и узлов вентилятора и компрессора низкого (среднего) давления (диски, лопатки, детали статора, кольца, корпусные детали), работающих при температуре до 350 °С неограниченно. Сплав отличается высокой технологичностью, однородностью химического состава, пониженной чувствительностью к концентраторам напряжений, возможностью многоцелевого применения. Металлургические предприятия поставляют полуфабрикаты из сплава BT6 в виде катаных прутков, штамповок дисков, раскатных колец, штамповок лопаток, листов. Используется для изготовления балок и кронштейнов в самолете Ту-154, Ту-204 и др.

Сплав BT16 применяется для изготовления деталей крепления в таких самолетах, как Ту-160, Ту-144, Ту-154, Ту-204, Ту-334. Из него изготавливают болты методом холодной высадки в отожженном состоянии на высокопроизводительных автоматах. Накатка резьбы осуществляется также в холодном состоянии. Организовано массовое производство холодно-высаженного нормализованного крепежа из сплава BT16.

Сплав BT22 (Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe) - первый из рассматриваемых сплавов закритической концентрации (количество β - стабилизаторов эквивалентно 11,5 % Mo). Он эффективно упрочняется при термической обработке и обладает достаточными эксплуатационными свойствами, позволяющими применять его в конструкциях шасси самолета ИЛ-86, ИЛ-96, ИЛ-76. Наличие в сплаве большого количества β - стабилизаторов обеспечивает ему хорошую прокаливаемость и эффективное упрочнение в сечениях до 150 мм. Это позволяет проводить упрочняющую термообработку в заготовке, а затем изготавливать деталь путем механической обработки. В отличие от других β - сплавов он имеет повышенное содержание алюминия и применяется в виде поволоков, штамповок, прутков при температуре до 350 °С. Сплав BT22 используется для изготовления стенок и баков в самолете Ту-154, а также фитингов и арматуры в Ту-204.

Сплав BT23 - высокопрочный свариваемый титановый сплав с температурой применения от -196 до +400 °С. Из этого сплава изготавливаются практически все виды

полуфабрикатов: фольга 0,08 мм; лента 0,1 мм; листы 0,6 - 10 мм; плиты до 250 мм; поковки и штамповки массой до 3,5 т; трубы горячекатаные, холоднокатаные и переменного сечения; прессованные профили; прутки.

В конструкции космического аппарата "Буран" практически все нагруженные узлы выполнены из сплава ВТ23 в состоянии после одного старения. Это позволило исключить на машиностроительном заводе высокотемпературное с защитной атмосферой закалочное оборудование и снизить расход электроэнергии в 2 - 3 раза. Для эффективного упрочнения достаточна температура 450-500 °С. Использование сплава ВТ23 и разработанных процессов позволило получить экономию сырьевых и энергетических ресурсов.

Сплав ВТ23 успешно применен в силовых конструкциях космического аппарата «Астрон». Из него изготовлены шаровые сварные баллоны, работающие под высоким внутренним давлением, с уровнем прочности $\sigma_B \geq 1200$ МПа. В конструкциях гидросамолета Бе-200 сплав ВТ23 применен для изготовления сварных и монолитных конструкций, в том числе для изготовления гидроаккумуляторов (рисунок 3).

Титановый высокопрочный свариваемый ($\alpha+\beta$)-сплав мартенситного типа ВТ23 успешно применен в конструкциях Як-55, Су-31, Су-26М и других. Ресурсные и циклические испытания узлов конструкций показали высокую надежность сплава в работе и его малую чувствительность к колебаниям параметров технологического процесса – термообработки, механической обработки и др.

Высокопрочный титановый сплав ВТ23М

Сплав ВТ23М является модификацией высокопрочного титанового сплава ВТ23 и имеет суженный диапазон легирования, что повышает стабильность механических свойств и характеристик работоспособности, а также снижает дисперсию механических свойств в 1,5 раза.

Усовершенствование высокопрочного хорошо свариваемого титанового сплава, обеспечивающего σ_B не менее 1100МПа, σ_B *св.соед.* не менее 0,9 от σ_B *оск.мат.* и удельную прочность основного материала $\sigma_{B/T} \geq 24$ км, что позволило:

- снизить массу конструкции на 40-50 % по сравнению с конструкциями из сплава ОТ4;
- значительно повысить технологичность изготовления листовых конструкций в холодном и горячем состоянии.

Сплав ВТ23М является высокопрочным свариваемым ($\alpha+\beta$)-титановым сплавом универсального применения:

- из него изготавливают все виды полуфабрикатов, полученных прокаткой, ковкой, прессованием;
- из него изготавливают все типы конструкций – монолитные, сварные и паяные.

Температура применения сплава – от минус 196 °С до плюс 400 °С. Сплав может быть применен в отожженном и термически упрочненном состоянии: либо после одного старения, либо после двойного отжига с охлаждением на воздухе, либо после закалки в воде и старения. Таким образом, имеются широкие возможности по применению различных схем термообработки, обеспечивающих получение широкого диапазона прочностных характеристик.

Сплав обладает сочетанием высокой прочности и высоких характеристик трещиностойкости (K_{Ic}) основного материала и сварных соединений, значительно превосходящим по уровню этих характеристик зарубежные аналоги.

Сплав ВТ23М находится в области легирования сплавов, в которых при закалке из β - области фиксируется α'' - фаза (пластичный мартенсит). Поэтому закаленные или быстро охлажденные в процессе изготовления полуфабрикаты будут иметь высокий комплекс механических свойств, что предотвратит их растрескивание и разрушение, имеющее место у другого класса сплавов.

Из высокопрочного свариваемого титанового сплава ВТ23М универсального применения изготавливают различного типа и назначения силовые конструкции: лонжероны, шпангоуты, обшивка, емкости (шаровые и цилиндрические), баллоны, сотовые панели, закладные элементы композиционных конструкций и др.

Из сплава ВТ23М изготавливают практически все виды полуфабрикатов: фольгу 0,08 мм; ленту 0,1 мм; листы (0,6 – 10) мм; плиты до 250 мм; поковки и штамповки массой до 3,5 т; трубы горячекатаные, холоднокатаные и переменного сечения; пресованные профили; прутки. Полуфабрикаты поставляют по техническим условиям с гарантированным уровнем механических свойств.

Серийное изготовление из сплава ВТ23М фольги, ленты и листов свидетельствует о его высокой технологической пластичности. Этот универсальный комплекснолегированный сплав нового поколения может быть применен как для широкой номенклатуры полуфабрикатов, так и для различного типа конструкций.

Комплексное легирование сплава ВТ23М при уменьшенной концентрации молибдена и ванадия и отсутствии олова и циркония (по сравнению со сплавами США Trans X206, Trans 134) обеспечивает более низкую стоимость и меньшую плотность (4,57 г/см³).

Сплав ВТ23М является сплавом «мартенситного» типа (как и известные отечественные сплавы ВТ6, ВТ14 и сплавы США: 6-4, 6-6-2, Corona 5, Trans X206, Trans134), что позволяет использовать уже существующее оборудование для его термической обработки, деформации, сварки, механической обработки. Сплав ВТ23М с ($\alpha+\beta$)-структурой обладает хорошей обрабатываемостью резанием, значительно превосходящей сплавы с β - структурой.

Высокопрочный свариваемый титановый сплав ВТ23М обладает на (200-300 МПа более высокой прочностью ($\sigma_B = 1100-1300$ МПа) и на 25 % более высокой вязкостью разрушения ($K_{Ic} \geq 93$ МПа.м^{1/2}), чем аналогичные зарубежные сплавы, а по стоимости ниже на 20 %, благодаря

Технологии позволяют варьировать, например, предел прочности листовых полуфабрикатов толщиной 1,5-3,5 мм от 980 до 1250 МПа. Достоинством сплавов этого класса является возможность варьирования температур как деформационной, так и термической обработки в достаточно широком интервале без риска снижения эксплуатационных комплексному легированию с использованием недорогих легирующих элементов.



Ракетно-космический комплекс “Энергия-Буран”. Общая масса деталей, изготовленных из сплава ВТ23 после ВТМО, 6т (в “Буране”) и 14т (в “Энергии”): шпангоуты, балки, лонжероны и стыковочные узлы



Космический корабль “Астрон”. Шаровые баллоны, изготовленные из сплава ВТ23 путем сверхпластической деформации (СПД), сварки и термоупрочнения ($\sigma_B \geq 1250$ МПа)



Гидросамолет Бе-200. Из сплава ВТ23 изготовлены гидроаккумуляторы и силовые детали



Спортивный самолет Су-29 (Су-26, Су-31, Су-31М, Су-31СК, Як-55). Из сплава ВТ23, с применением высокоскоростной закалки и старения, изготовлены детали шасси с $\sigma_B \geq 1250$ МПа

Рис. 3. Применение титанового сплава ВТ23 в конструкциях авиакосмической техники

Применение сплава ВТ23М для изготовления такой различной по своему назначению номенклатуры деталей из одного вида полуфабрикатов стало возможным во многом благодаря применению технологии высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) и технологии термической обработки. Указанные характеристик и получения заданного комплекса свойств, отвечающих требованиям к различным деталям конструкции.

Высокопрочный титановый сплав ВТ23М планируется применять в перспективном истребителе нового поколения «ОКБ Сухого» взамен сплава ВТ23. Общий вес конструкций, изготовленных из сплава, составляет 17,66% от веса планера. Именно в изготовлении узлов и конструкций истребителя пятого поколения полностью реализованы возможности широкого варьирования свойств сплава для достижения наиболее оптимальных эксплуатационных характеристик, обеспечивающих заданный ресурс работы изделия.

Заключение

Сплав ВТ23М представляет собой логичное развитие современных высокопрочных титановых сплавов и является перспективным для применения в новых конструкциях и изделиях авиационно-космической техники. В связи с чем представляет интерес исследование структуры полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23М после различных режимов термической обработки, так как весьма актуальной задачей является разработка энергосберегающих технологий термической обработки, обеспечивающих высокий уровень эксплуатационных характеристик.

Литература

1. Глазунов С.Г. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 368 С.
2. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: «МИСИС», 1999. – 416 С.
3. Макквиллэн М.К. Фазовые превращения в титане и его сплавах. М.: Металлургия, 1969.-190 С.
4. Фролов, К.В. Машиностроение. Энциклопедия // К.В. Фролов. – М.: Машиностроение, 2001. – 190 С.
5. Хорев А.И. Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1979. - 228 С.
6. Хорев А.И. Теория легирования и термической обработки конструкционных – титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности // Авиационные материалы и технологии: сб. науч. тр./ ФГУП «ВИАМ». – М., 2010, С.21- 22
7. Чечулин Б.Б. Титановые сплавы в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1977.- 248 С.
8. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Влияние термической обработки на свойства листов из высокопрочного титанового сплава ВТ23М. // Авиационные материалы и технологии. – 2013. - №4. – С. 8-13.
9. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Филатов А.А., Бурханова А.А., Попова Ю.А. Эффективность применения титанового сплава ВТ23 в новых изделиях «ОКБ Сухого». // Титан. – 2013. - №2. – С. 39-42

УДК 669.018.9:621.791.18:621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-ТИТАН

Сергей Эдуардович Куркин

Студент 4 курса

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: Т.В. Соловьева

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Данная работа посвящена технологии получения листового материала из системы Ti - Al, заключающаяся в том, что вначале получают слоистый материал, составленный из чередующихся слоев титана и алюминия, путем сварки в твердой фазе при их совместной деформации при прокатке, а затем полученный слоистый материал подвергают термообработке с образованием необходимого количества интерметаллидов в объеме заготовки.

Одной из особенностей предлагаемого способа является то, что при достижении физического контакта между титаном и алюминием начинают образовываться интерметаллиды, резко снижающие технологическую деформируемость материала. Поэтому процесс был построен таким образом, чтобы при получении слоистого материала не допустить образования хрупких химических соединений Ti - Al. Как отмечается в работе [1] в нанопленках Ti - Al реакция взаимодействия начинается при температуре на 300-400 К ниже температуры плавления алюминия 933 К. Отмечено, что температура инициирования реакции зависит от толщины пленки. В данном случае толщина пленки составила 3,8-125 нм. В работе [2] показано, что нагрев сваренной взрывом 3-хслойной заготовки композиции АМг6-АД1-ОТ4 в интервале 150- 550 °С с выдержкой 1-2 часа не приводит к появлению интерметаллидных прослоек на границе Ti - Al, а их зарождение начинается при температуре свыше 550 °С. Установлено, что с увеличением обжата толщина переходной зоны увеличивается. Латентный период зависит от степени обжата и температуры.

При получении слоистого композита исходными материалами были выбраны технически чистый титан марки ВТ1-0 и алюминиевый сплав АД1.

В соответствии с требованиями ОСТ 1-90145-74 «Фольга из титановых сплавов» титан поставляется в нагартованном состоянии и по своим пластическим характеристикам заметно уступает алюминию. С целью увеличения пластических характеристик титанового слоя и предотвращения надрывов в процессе прокатки фольгу отжигали при 530 °С в вакууме с последующим медленным охлаждением. Такой смягчающий отжиг также позволил снизить содержание азота и водорода в титане, тем самым дополнительно повышая его пластичность.

Из титановых карточек размером 0,1x50x100 мм и алюминиевых пластин размером 0,02x50x100 собирали пакеты с различными толщинами и соотношениями слоев. Для предотвращения окисления слоев, поглощения титаном газов при активном его взаимодействии с атмосферой и обеспечения условий для прочного соединения слоев твердофазную диффузионную сварку прокаткой вели в вакууме (при 0,01 Па) при температурах 450-520 °С. Такой температурный режим исключал образование хрупких интерметаллидов между слоями, резко снижающих технологическую пластичность материала, но сохранял достаточную его деформируемость. Установлено, что при 470 °С интерметаллиды практически не образуются (их содержание не превышало 0,5 %).

Нагретый до требуемой температуры собранный пакет вначале обжимали на вакуумном двухвалковом прокатном стане ДУО-170 в ИМЕТ РАН, а затем уже сваренные пакеты

раскатывали на воздухе на двухвалковом стане ДУО-300 и четырехвалковом стане КВАТРО 110/320x300 при температуре 450 °С.

При составлении пакета исходили из необходимости получения требуемого стехиометрического состава для преимущественного образования интерметаллида γ -TiAl с учетом большой неравномерности обжатия слоев разной прочности при их совместной пластической деформации, особенно на ее конечных стадиях. В результате были выбраны пакеты с толщиной слоев титан/алюминий 100/20, 100/40, 100/60 и 100/200 мкм. Для предотвращения взаимного смещения слоев передний конец пакета фиксировался с помощью стальных заклепок, а для устранения сдвига слоев валками в направлении прокатки при подаче пакета, а также для получения более равномерной его деформации применяли стальные обкладки толщиной 1 мм. На внутреннюю поверхность защитных стальных полос наносили противосварочную пасту.

Установлено, что при прокатке пакета на первом проходе при диффузионной сварке оптимальной является степень деформации 25-40 %, а при последующей раскатке сваренных слоев 8-10 % за проход. При пакетной прокатке наблюдается значительная неравномерность деформации титанового и алюминиевого слоев, причем в большей степени деформируются слои алюминия. Несмотря на предварительно проведенный смягчающий отжиг, в менее пластичных титановых слоях образуются местные сужения, что, в конечном итоге, приводит к нарушению сплошности этих слоев, поскольку при одинаковых степенях деформации титан уже начинает разрушаться, а алюминий еще сохраняет целостность. При этом разрывы титанового слоя носят периодический характер, связанный с накоплением деформации до критического значения. При прокатке пакета до толщины 0,4 мм в большей степени деформируются приповерхностные слои, как видно из рисунка 1.

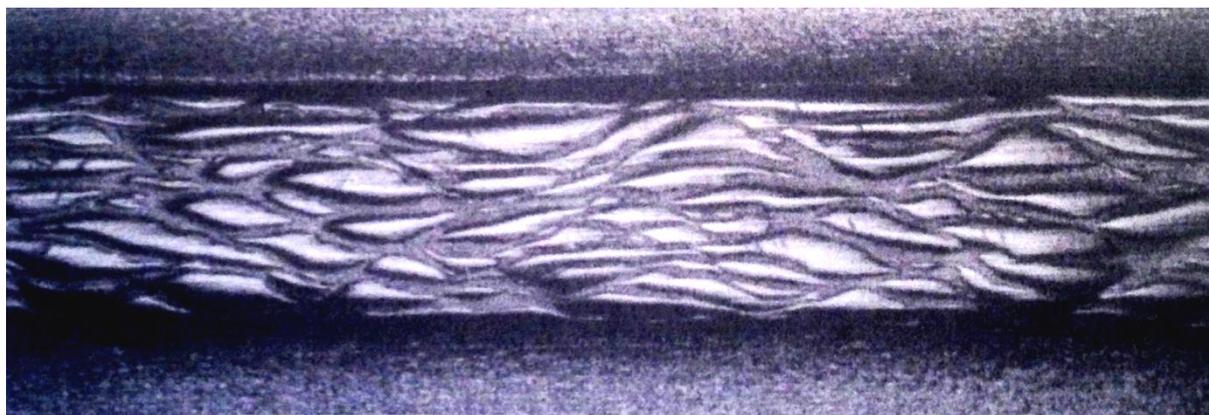


Рис. 1. Структура слоистого материала системы Al-Ti после прокатки с обжатием 96 %

Таблица 1. Микротвердость в слоях титана и алюминия образцов разной толщины

Номер измерения	Микротвердость, при разной толщине образцов, МПа			
	2,4 мм (обжатие 42%)		0,4 мм (обжатие 98%)	
	Ti	Al	Ti	Al
1	1803,2	539	1744,4	695,8
2	2009	607,6	1999,2	686
3	1871,8	558,6	1920,8	666,4
4	1999,2	529,2	1783,6	686
5	1842,4	568,4	1724,8	676,2
6	1950,2	578,2	1842,4	705,6

Степень деформации в этих слоях не превышала в среднем 50—60%, в то время как в центральных слоях она составляла в среднем 35—45%. Такую особенность обжатия слоев необходимо учитывать при формировании пакета. Таким образом, изменяя толщину исходного пакета, можно получить слоистый материал с различными служебными характеристиками, что расширяет области применения получаемого слоистого материала.

Степень нагартованности составляющих пакета оценивали по изменению микротвердости слоев титана и алюминия. Данные измерения микротвердости приведены в таблице 1.

При увеличении обжатия слоистой заготовки с 45 до 98% микротвердость титановых слоев практически не изменилась, тогда как у алюминиевых она увеличилась на 30—40 %.

Для образования интерметаллидов полученный слоистый композиционный материал подвергался нагреву до 510, 590 и 1000 °С. В результате экзотермической реакции на границе раздела «титан-алюминий» образовывались интерметаллические фазы.

Соотношение слоев оказывает существенное влияние на прочностные и пластические свойства материала. Механические испытания показывают, что увеличение доли слоев алюминия в пакете приводит к повышению прочности и снижению пластичности композита. Это объясняется активным образованием интерметаллидов по границам раздела Ti—Al. Так, у материала с соотношением 1:1 слоев Ti и Al $\sigma_b = 198$ МПа; $\sigma_{0,2} = 151$ МПа; $\delta = 2,9\%$, а при соотношении слоев 1:2 получили $\sigma_b = 297$ МПа; $\sigma_{0,2} = 248$ МПа; $\delta = 0,36\%$ (таблица 2). В целом механические свойства слоистого материала значительно выше, чем у монолитного алюминия, но ниже, чем у монолитного титана. Это можно объяснить нарушением сплошности титанового слоя. Характер разрушения образцов был хрупким.

Таблица 2. Механические свойства слоистого и монолитного материалов после прокатки

Материал	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ , МПа
Ti-Al 1/1	2,91	161	198
Ti-Al 1/2	0,36	248	297
Ti (BT1-0)	20	245-343	392-539
Al (AD1)	30	30	90

Таблица 3. Условия термообработки разных композиций Ti/Al и общее количество интерметаллидов, а также оксидов в листе после термообработки

Соотношение исходных материалов (Ti:Al)	Среда	Температура, °С	Время нагрева, мин	Выдержка, ч	Содержание, % объемн.		
					Интерметаллиды Ti-Al	TiO ₂	Al ₂ O ₃
1:1	После прокатки, без отжига				<6	0,6	-
1:1					4,3	2,6	0,9
1:1	Воздух	1100	225	НГ	16	17	13
1:2	Воздух	1100	225	НГ	3	72	24
1:1	Вакуум	590	42	НГ	36	-	-
1:1	Вакуум	590	42	4	34	-	-
1:1	Вакуум	650	42	4	7	-	-
1:1	Вакуум	510	42	НГ	11	-	-
1:2	Вакуум	590	42	4	92	-	-
1:2	Вакуум	590	42	НГ	97	-	-
1:2	Вакуум	590	42	1	97	-	-
1:2	Вакуум	510	42	НГ	12	-	-

Примечание. НГ – нагрев с печью без выдержки.

С целью получения равномерного распределения интерметаллических фаз оптимального размера по объему композита при большем их количестве проводили отжиг образцов при разной температуре (510-1000 °С) и продолжительности выдержки (0-4 ч). Фазовый состав и количество образовавшихся при нагреве интерметаллидов определяли на установке рентгеноструктурного анализа ДРОН. Условия и результаты отжига приведены в таблице 3.

Рентгеноструктурный анализ слоистого материала показал, что после деформации все же образуется в совокупности до 4-6 % интерметаллидов Ti₃Al, TiAl и Ti₂Al. Это связано, очевидно, с локальным разогревом материала свыше 500 °С при деформации [5]. Указанные интерметаллиды присутствуют в материале после любой термообработки. Следует заметить, что при изменении соотношения слоев Ti/Al равное 1:2 было образовано подавляющее количество интерметаллида TiAl₂ (до 90 %).

Ввиду того что, материал был слоистым, распределение выше перечисленных интерметаллидов в объеме заготовки после термообработки было практически равномерным и изменялось в зависимости от температурных и временных условий в пределах от 16 до 97 %. Толщина диффузионной зоны составляла 20-30 нм. Таким образом процесс образования интерметаллидов в слоистом материале является управляемым и в зависимости от требуемых свойств можно создать необходимую объемную долю интерметаллидов, которая и обуславливает механические и функциональные характеристики материала.

Выводы.

1. Анализ физико-химических процессов, протекающих на границе титана и алюминия, позволил разработать концепцию технологии получения слоистого материала, заключающаяся вначале в создании слоистого материала из исходных металлов Ti и Al путем сварки в твердой фазе в вакууме без образования интерметаллидов, которые снижают технологическую деформируемость материала, а затем при термообработке создать количество упрочняющих интерметаллидных фаз.

2. Разработаны температурно-деформационные режимы прокатки в безокислительных условиях пакетов, состоящих из чередующихся фольг толщиной 0,1 мм по 30 шт. каждого металла. Предложены технологические приемы, которые способствовали получению слоистого материала системы Ti - Al с хорошей прочностью соединения слоев. Удалось получить слоистый материал с наноразмерными слоями. Нарботана опытная партия слоистого материала для дальнейших исследований.

3. Проведены исследования послойной деформации слоев титана и алюминия в пакете. Установлено, что, как и следовало ожидать, слои из алюминия продеформировались на 30-40 % больше чем слои из титана, что привело к шейкообразованию титанового слоя и, следовательно, к нарушению его сплошности. Приповерхностные слои деформировались на 10-15 % больше обоих материалов.

4. Проведена термообработка слоистого материала. В результате экзотермической реакции на границе раздела титана и алюминия образовались химические соединения. Исследованы температурные и временные условия образования интерметаллидов. Рентгеноструктурный анализ показал, что при всех условиях термообработки в заготовке образовались интерметаллиды Ti_3Al , $TiAl$ и $TiAl_2$, количество которых зависело от температуры и времени выдержки.

5. Показано, что механические свойства слоистого материала непосредственно после холодной прокатки изменяются в зависимости от соотношения количества пластин титана и алюминия.

Предложенный технологический поход открывает широкие перспективы для получения листового слоистого материала системы Ti-Al, упрочненного интерметаллидными фазами.

Литература

1. *Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгунов В.Г.* Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. – М.: ЗАО «Металлургиздат», 2004. – 254 с.
2. *Аркулис Г.Э.* Совместная пластическая деформация разных металлов. – М.: Metallurgia, 1964. – 305 с.
3. *Король В.К., Гильденгорн М.С.* Основы технологии производства многослойных металлов. М.: Metallurgia, 1970. – 280 с.
4. *Кобелев А.Г., Лысак В.И. и др.* Материаловедение и технология композиционных материалов: Учебник для вузов. М.: Интермет инжиниринг, 2006. – 368 с.
5. *Nishiyama Y., Miyashita T., Isobe S. and Noda T.* // Proc. Joint ASM/TMS. Symp. On «High temperature aluminides and intermetallics (ed.S. H. Whang et al), Warrendale, PA, TMS, 1990. P. 557.

УДК 669.715:018.8

КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТОНКОЛИСТОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АСВ-1

Любовь Николаевна Мищук

Студент 6 курса

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.А. Пучков

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Тонколистовые сварные соединения из алюминиевых сплавов, получаемые методом лазерной сварки перспективны для создания бортовых несущих конструкций летательных аппаратов. Основными причинами применения этого метода является экономия материала и снижение объема механической обработки.

Целью работы является выбор и обоснования технологических мероприятий, позволяющий получать качественные лазерные сварные соединения из тонколистовых алюминиевых сплавов.

В качестве объекта исследования были выбраны листы из сплава АСВ-1 толщиной 1 мм. Химический состав представлен в табл. 1. На поверхность свариваемых листов наносили гальваническим методом никелевое покрытие толщиной 6 мкм. Сварные конструкции получали на автоматизированной лазерной установке LRS-300AU, рабочим инструментом которой является сфокусированный луч импульсного твердотельного лазера, работающего в режиме свободной генерации [1]. Для анализа сварных конструкций применяли маталогографический метод с использованием микроскопа OLYMPUS GX-51 и твердомера STRUERS DuraScan. Коррозионные исследования, включающие потенциометрию, потенциодинамический анализ, электрохимическую импедансную спектроскопию [3, 4], выполняли с использованием потенциостата IPC-Pro-MF и анализатора частотного отклика FRA-2. Коррозионные испытания проводили в камере соляного тумана в 3%-ном водном растворе NaCl.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава, % (мас.) (ТУ 1-809-680-85)

Сплав	Al	Mg	Mn	Zn	Ti	Cr	V
АСВ-1	Ост.	0,8	1,8	0,6	0,6	0,5	0,6

Металлографическому анализу на коррозионную стойкость были подвергнуты стыковых сварных соединений с гальваническим никелевым покрытием и без него. Полученные данные занесены в таблицу 2.

Металлографическим анализом выявлены участки питтинговой коррозии (рис. 1) по центру шва, очаги межкристаллитной коррозии на участках шва, примыкающих к основному сплаву, а также частичное отслоение покрытия (рис. 2) в зоне термического влияния.

Питтинг связан с увеличением концентрации примесей в центре шва, а также наличием в нем пор и микротрещин, образующихся при импульсной сварке.

Межкристаллитная коррозия возникает из-за наличия в шве не полностью растворяющихся во время сварки участков никелевого покрытия.

Отслаивание покрытия связано с появлением при сварке напряжений в околошовной зоне.

Таблица 2. Сравнение коррозионной стойкости сварных соединений

Сплав		АСВ - 1	
		Без покрытия	С покрытием (хим. Н)
площадь сварного шва, пораженного коррозией, %		100	50
Питтинг в ЗТВ	$S_{\text{пит}}/S_{\text{пов}}$ (А), %	-	2
	Размер (В), мм ²	-	-
	Глубина (С), мм	-	1
Отслаивание покрытия в ЗТВ, %		-	1
Ширина ЗТВ, пораженной питтингом, мм		-	5

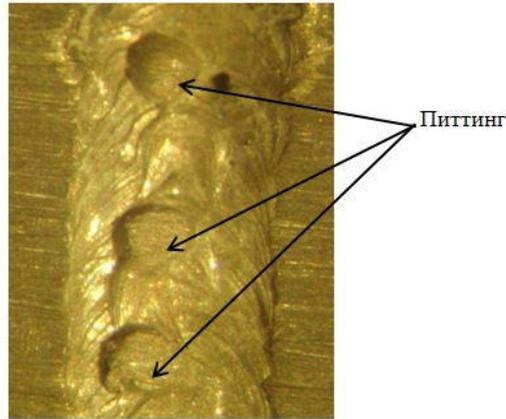


Рис. 1. Внешний вид поверхности соединений, после проведения коррозионных испытаний в течение месяца. Сплав: АСВ-1, шов, тип образца: «Стыковой», х50

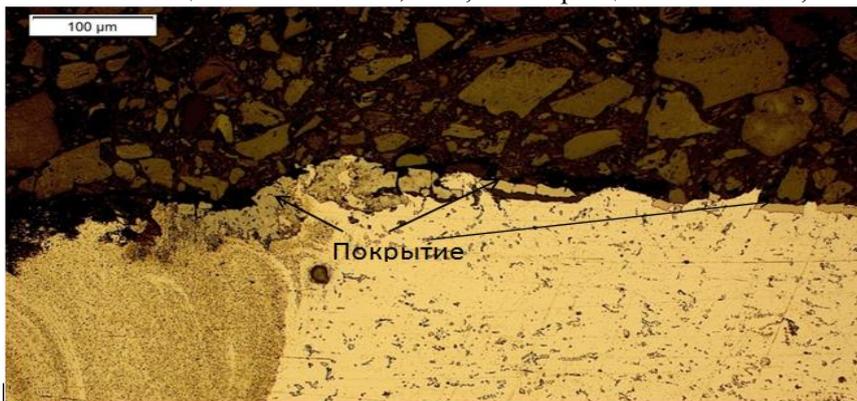


Рис. 2. Внешний вид поверхности соединений, после проведения коррозионных испытаний в течение месяца. Сплав: АСВ-1 хим.Н, тип образца: «Стыковой», х50

Методами потенциометрии и потенциодинамического анализа показано [2], что шов является анодом по отношению к сплаву и обладает более высокой способностью к самопассивации (рис. 4). Линейные показатели коррозии шва ниже, чем у основного металла (рис. 4).

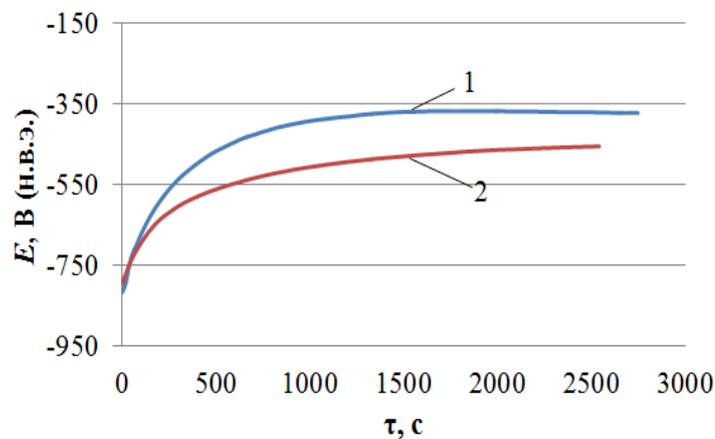


Рис. 3. Влияние продолжительности выдержки на потенциал свободной коррозии сплава АСВ-1 в 3%-ном водном растворе NaCl:
1- сплав, 2- шов

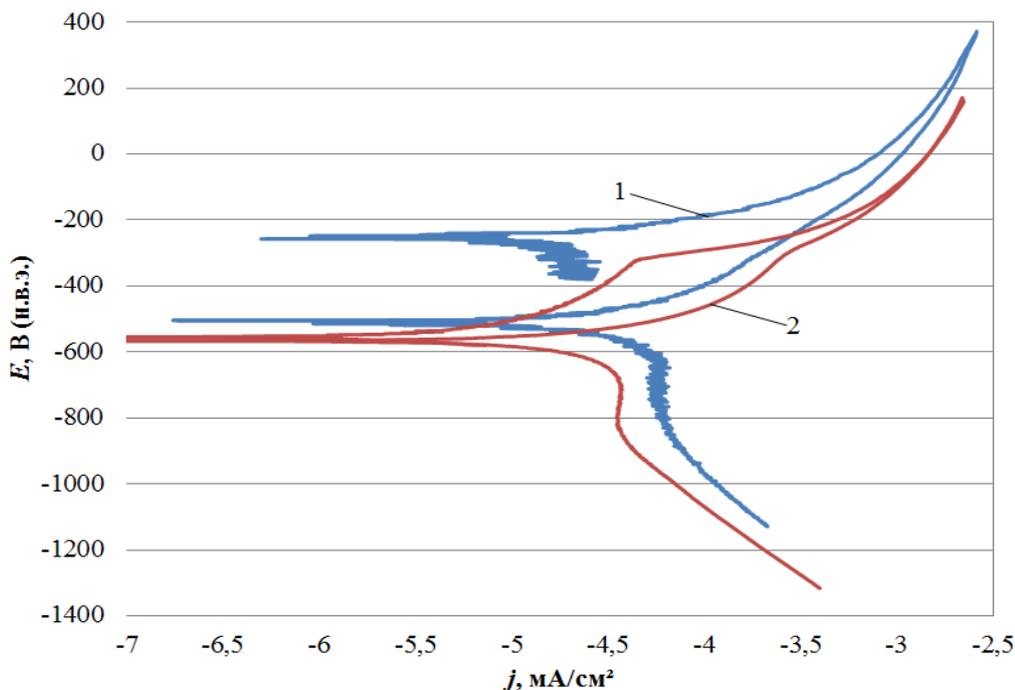
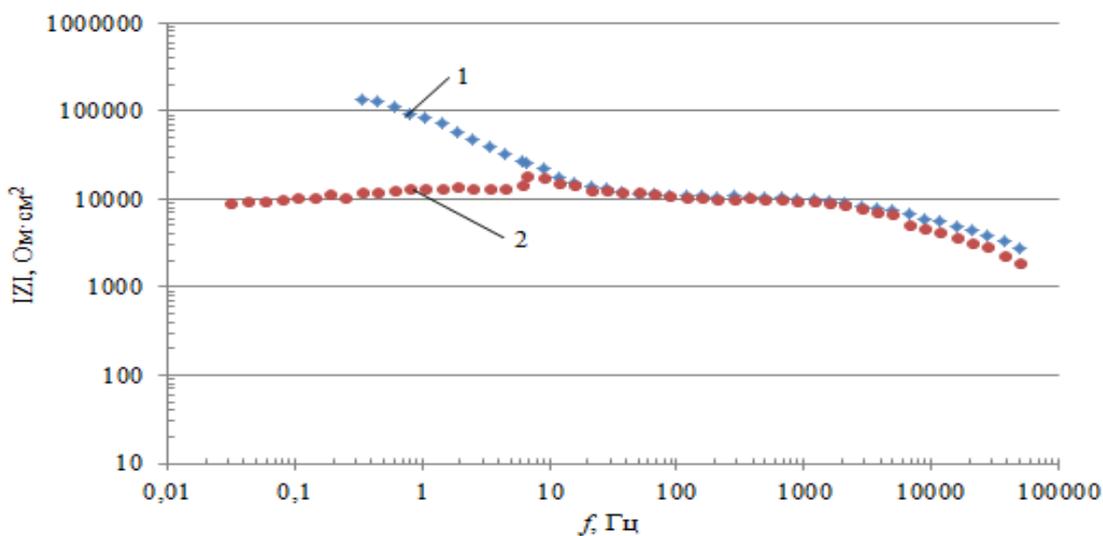


Рис. 4. Поляризационные диаграммы сплава АСВ-1 в 3%-ном растворе NaCl:
1- сплав, 2- шов

Импедансные спектры, снятые для шва и основного сплава, приведены на рис. 5. Экспериментальные данные представлены на диаграммах Бode, в которых модуль импеданса $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ (R - активное и X - реактивное сопротивление) и фазовый угол θ построены относительно частоты f . В этих координатах наиболее детально проявляются все изменения отклика исследуемой системы на возмущающий сигнал. На диаграмме Бode $Z(f)$ наблюдаются два максимума, свидетельствующие о двухслойном строении защитной пленки на поверхности шва и основного металла. Это подтверждает также минимумом на зависимости фазового угла от частоты.



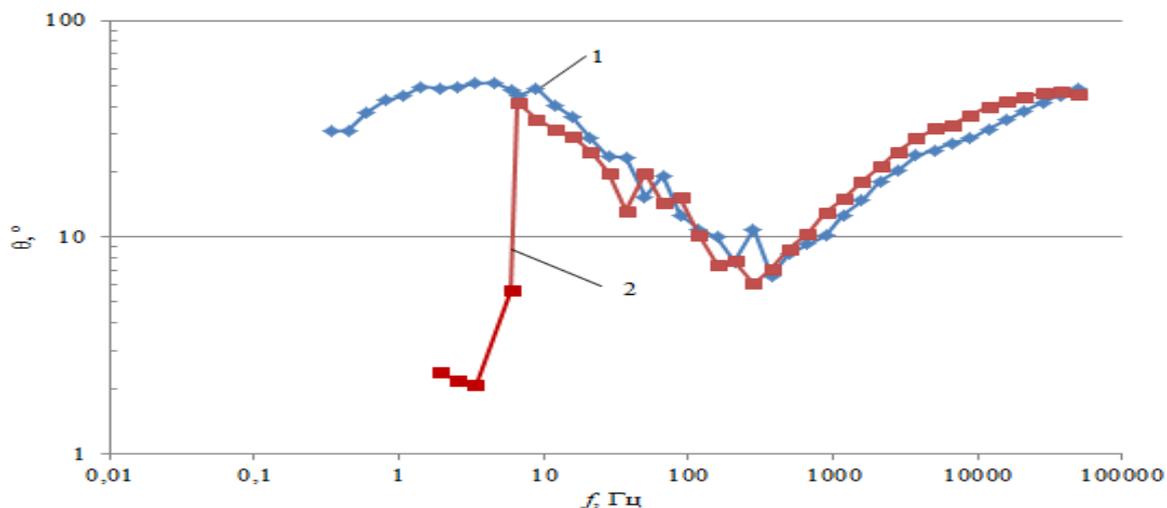


Рис. 5. Диаграмма Бode (изменение модуля импеданса и фазового угла от частоты) для электрода из алюминиевого сплава АСВ-1: 1- шов, 2-сплав

На рис. 5 представлена эквивалентная электрическая схема, которая в наибольшей степени соответствует экспериментальным спектрам. По ней можно судить о поведении системы.

Электролит контактирует с поверхностью слоя гидроксида и через поры в слое гидроксида - с участками поверхности оксида. Поры гидроксида заполнены электролитом, отличающимся по составу и электрическому сопротивлению от электролита, окружающего сплав. Сопротивление электролита на схеме обозначено R_3 , сопротивление пленки гидроксида алюминия - R_1 , а емкость, обусловленная наличием на поверхности раздела электролит/гидроксид двойного электрического слоя - C_1 . Соответственно, сопротивление оксида алюминия обозначено R_2 , а емкость, обусловленная наличием на поверхности раздела электролит/оксид двойного электрического слоя - C_2 . Обработка спектров показала, что активное сопротивление слоя защитной пленки из оксида алюминия на порядки выше активного сопротивления слоя из гидроксида табл. 3. Таким образом, электроперенос через защитную пленку сдерживается преимущественно слоем из оксида алюминия. В тоже время емкость двойного электрического слоя на границе раздела оксида алюминия/гидроксид алюминия на порядки ниже емкости двойного электрического слоя на поверхности границы раздела оксид алюминия/электролит, что свидетельствует о высокой пористости не имеющей сквозного характера в слое гидроксида алюминия. Слою оксида соответствуют части кривых при частотах ниже 1000 Гц, слою гидроксида - выше 1000 Гц.

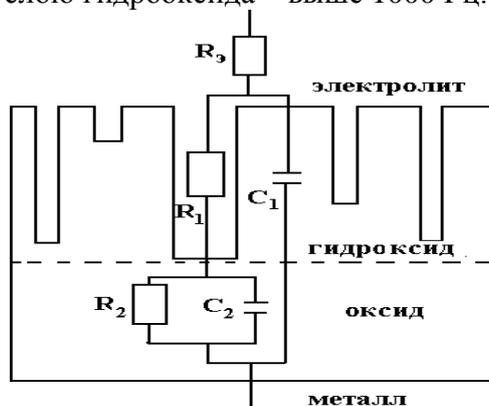


Рис. 6. Модель строения защитной пленки и эквивалентная электрическая схема, использованная для подгонки экспериментальных импедансных спектров

Таблица 3. Характеристики электрической эквивалентной схемы

	Шов	Сплав
C_1	$3,4646 \cdot 10^{-9}$	$2,508 \cdot 10^{-9}$
C_2	$1,1908 \cdot 10^{-6}$	$1,2869 \cdot 10^{-6}$
R_3	1449,7	1990,9
R_1	8260,9	8304,9
R_2	17801	$1,2054 \cdot 10^5$

Из таблице видно, что величина сопротивления оксида алюминия (R_2) и емкость двойного электрического слоя (C_2) снятая для сплава имеет значение выше, чем шва, следовательно, пленка на поверхности шва менее устойчивая.

Выводы

По результатам металлографического исследования были выявлены участки питтинговой коррозии по центру шва, очаги межкристаллитной коррозии на участках шва, примыкающих к основному сплаву а также частичное отслоение покрытия в зоне термического влияния.

Методом потенциометрии показано, что шов является анодом по отношению к сплаву. Потенциодинамическим анализом установлено, что линейные показатели коррозии шва ниже чем у основного металла и шов обладает более высокой способностью к самопассивации. Электрохимическая импедансная спектроскопия выявило двухслойное строение защитной пленки на поверхности шва и основного металла и подтвердила более высокое сопротивление защитной пленки на поверхности шва.

По результатам выполненной работы рекомендуется покрытие наносить после процесса сварки и заменить импульсную лазерную сварку на непрерывную.

Литература

1. Мищук Л.Н. Структура и свойства сварных тонколистовых соединений из алюминиевых сплавов. // Молодежный научно-технический вестник. Выпуск № 6. 2014. - 11 с.
2. Пучков Ю.А. и др. Система компьютеризированных методов исследования электрохимической коррозии Металловедение и термическая обработка металлов.- М: Машиностроение, 1996. N5, с. 37-39.
3. Буянова Е.С., Емельянова Ю.В. Импедансная спектроскопия электролитических материалов: учеб.пос. / Под ред. Е.С. Буянова. – Екатеринбург: УГУ, 2008. – 70 с.
4. Irvin J.T.S., Sinclair D.C., West A.R. Electroceramics. Characterization by Impedance Spectroscopy. // Advanced Materials. 1990. V.2. N.3 P.132-138.

УДК 621.785.5

ВАКУУМНАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ ВКС-10

Алла Сергеевна Мохова

Студентка 5 курса

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Е. Смирнов

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Приведены результаты исследований вакуумной комбинированной химико-термической обработки стали ВКС-10, которая состоит из последовательно проводимых вакуумной цементации, окончательной термической обработки, шлифования и ионно-плазменного азотирования на заключительной стадии. Представлены результаты серии экспериментальных исследований вакуумной цементации и вакуумной комбинированной химико-термической обработки. Показана возможность получения протяженных диффузионных слоев, формируемых при вакуумной цементации, с высокой поверхностной твердостью, получаемой после ионно-плазменного азотирования. Проведена оценка влияния общего времени процесса и соотношения времен активной и пассивной стадий циклической подачи среды на параметры диффузионных слоев.

Ключевые слова: вакуумная цементация, термическая обработка, ионно-плазменное азотирование, протяженные диффузионные слои, поверхностная твердость.

Введение

Совершенствование технологии производства зубчатых передач редукторов газотурбинных двигателей – одна из важнейших проблем для авиационной отрасли. Актуальность ее решения возрастает в связи с разработкой газотурбинных двигателей нового поколения, для которых характерен значительный рост силовой и тепловой напряженности всех его деталей, включая зубчатые колеса [1].

Зубчатые колеса относятся к наиболее сложным в конструктивном и технологическом отношении деталям. Для них высокий уровень рабочих напряжений сочетается с требованиями высокой долговечности и эксплуатационной надежности. Выполнение этих требований диктует необходимость применения новых более теплостойких сталей и новых высокоэффективных процессов химико-термической обработки (ХТО).

Производственная практика и результаты исследований показывают, что цементуемая сталь ВКС-5 не отвечает возросшим требованиям. Эта сталь не обладает достаточной теплостойкостью. Твердость цементованного слоя этой стали при кратковременной выдержке при температуре 550 °С снижается с 60-61 HRC до 54-56 HRC, что служит причиной снижения износостойкости и контактной прочности.

В соответствии с возникшими проблемами, специалистами ВИАМа разработана теплостойкая сложнолегированная сталь ВКС-10 (13Х3Н3М2ВФБ-Ш). В результате комплексного легирования такими карбидообразующими элементами, как Cr, Mo, W, V, Nb, теплостойкость стали повышена до 450 °С. В присутствии таких элементов образование в структуре дисперсной карбидной фазы обеспечивает измельчение зеренной структуры, повышение статической и циклической прочности. Введение никеля (~3 %) способствует увеличению ударной вязкости, хладостойкости и прокаливаемости.

Между тем главное функциональное назначение сталей – обеспечение возросших требований к эксплуатационным свойствам зубчатых колес – контактной и циклической

прочности, износостойкости, уровень которых зависит от свойств поверхностного слоя. В этой связи для реализации потенциальных возможностей новой сложнолегированной стали требуется разработка и внедрение современных упрочняющих технологий. К ним относится процесс комбинированной химико-термической обработки, сочетающий в себе возможности и преимущества высокотемпературной (вакуумная цементация и нитроцементация) и низкотемпературной обработки (ионно-плазменное и вакуумное азотирование, жидкостная карбонитрация).

Разработка технологии комбинированного процесса для новой теплостойкой стали открывает возможности для повышения служебных свойств ответственных деталей турбо- и моторостроения.

Задачи настоящей работы – исследование влияния параметров вакуумной цементации (ВЦ) (общего времени процесса и соотношений времен активной и пассивной стадий циклической подачи среды) на параметры диффузионных слоев и анализ влияния ионно-плазменного азотирования (ИА) на свойства приповерхностной части диффузионного слоя.

Материалы и методики исследований

Объекты исследований изготавливали из стали мартенситного класса 13X3H3M2VФБ-Ш (ВКС-10), состав которой приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемой стали

Марка стали	Химический состав, %											
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	W	Si	V	Nb	Al	S	P
ВКС-10	0,1-0,15	3,0-3,4	2,7-3,0	1,9-2,3	0,3-0,6	0,2-0,5	0,17-0,37	0,05-0,15	0,05-0,15	≤0,04	≤0,015	≤0,015

Особенность стали – способность к интенсивному науглероживанию поверхности в результате образования в диффузионном слое повышенной объемной доли избыточной карбидной фазы. Эта особенность может обеспечить требования к поверхностному слою зубьев колес после цементации.

Высокая теплостойкость стали обеспечена комплексным легированием хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием и ниобием. Благодаря такой системе легирования сталь способна длительно сохранять при нагреве требуемую высокую твердость (60-63 HRC) цементованной поверхности.

Вакуумную цементацию осуществляли на опытной установке по циклическому режиму при температуре 920 °С. Рабочая среда – ацетилен. Общее время цементации варьировали от 1 до 3 ч. Параметры циклической подачи ацетилена изменяли следующим образом: время активной стадии τ_a составляло от 1 до 7 мин, время пассивной стадии τ_n – от 27 до 57 мин. При этом суммарное время активных и пассивных стадий цикла за все время насыщения составляло от 5 до 16 мин и от 55 до 164 мин соответственно. Таким образом соотношение суммарных времен активных и пассивных стадий циклической подачи среды варьировали от 0,06 до 0,12.

После ВЦ проводили упрочняющую термическую обработку, которая включала высокий отпуск (660 °С, 6 ч, в карбюризаторе), закалку (1010 °С, 1 ч, масло), двукратный отпуск (510 °С, 1,5 ч, воздух), обработку холодом (-70 °С, 2 ч) и заключительный отпуск для снятия внутренних напряжений (510 °С, 1,5 ч, воздух). (рис. 1).

После упрочняющей ТО проводили шлифование с припуском 0,2 мм.

На заключительной стадии обработки проводили ионно-плазменное азотирование. Процесс осуществляли при температуре 500 °С в атмосфере 95 % N₂ + 5 % H₂. Длительность ИА составляла 10 ч при давлении 2 мм рт.ст. и напряжении на катоде 400 В.

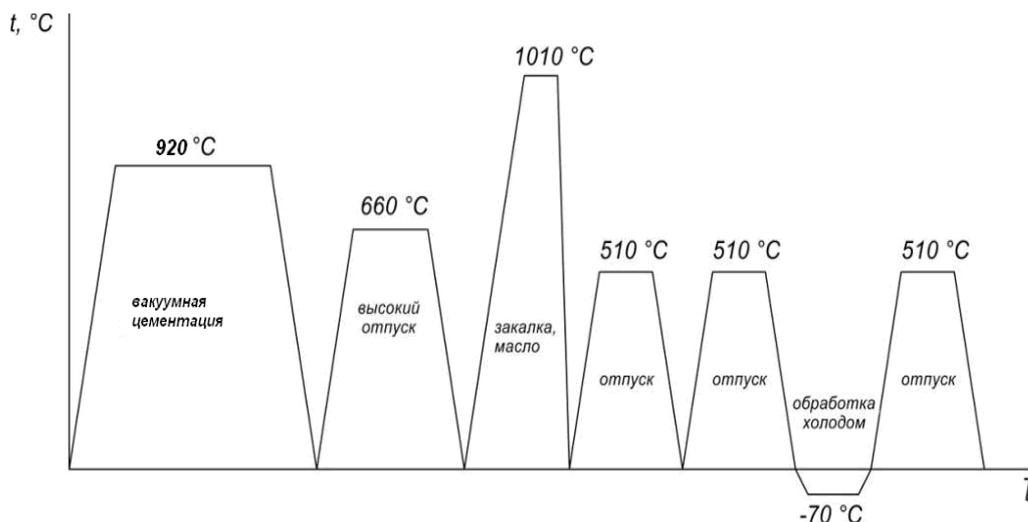


Рис.1. Схема химико-термической и полной термической обработки стали ВКС-10

Исследовали образцы сталей как после вакуумной цементации и упрочняющей ТО, так и после вакуумной цементации, упрочняющей ТО и ионно-плазменного азотирования.

Металлографические исследования проводили на микроскопе Olympus GX-51 при увеличениях $\times 200$ и $\times 500$. Микрошлифы изготавливали по традиционной методике.

ДюрOMETрические исследования состояли в измерении твердости поверхности образцов по методу Роквелла на приборе TP5006-02 при нагрузке 150 кг и измерение микротвердости на приборе DuraScan при нагрузке 0,1 кг.

Эффективную толщину слоя определяли по результатам дюрOMETрического анализа на образцах, прошедших полный цикл упрочняющей термообработки. За эффективную толщину принимали расстояние от поверхности до точки с микротвердостью 500 HV0,1.

Для выявления микроструктуры образца использовали стандартный для сталей травитель – 3-4 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Образцы протравливали наполовину (на протравленной половине проводили металлографические исследования, а на оставшейся – измеряли микротвердость).

Результаты исследований

Анализ результатов ВЦ, проведенный после упрочняющей ТО, показал, что при увеличении общего времени насыщения увеличивается не только эффективная толщина диффузионного слоя (рис. 2, а), но и твердость поверхности (рис. 2, в); при этом подтверждены литературные данные [2, 3] о параболической зависимости эффективной толщины слоя от общего времени насыщения.

В отличие от общего времени насыщения, соотношения времени активных и пассивных стадий цикла оказывает влияние в основном на приповерхностную часть диффузионного слоя, изменяя при этом твердость поверхности (рис. 2, г); эффективная толщина слоя при этом остаётся практически неизменной (рис. 2, б).

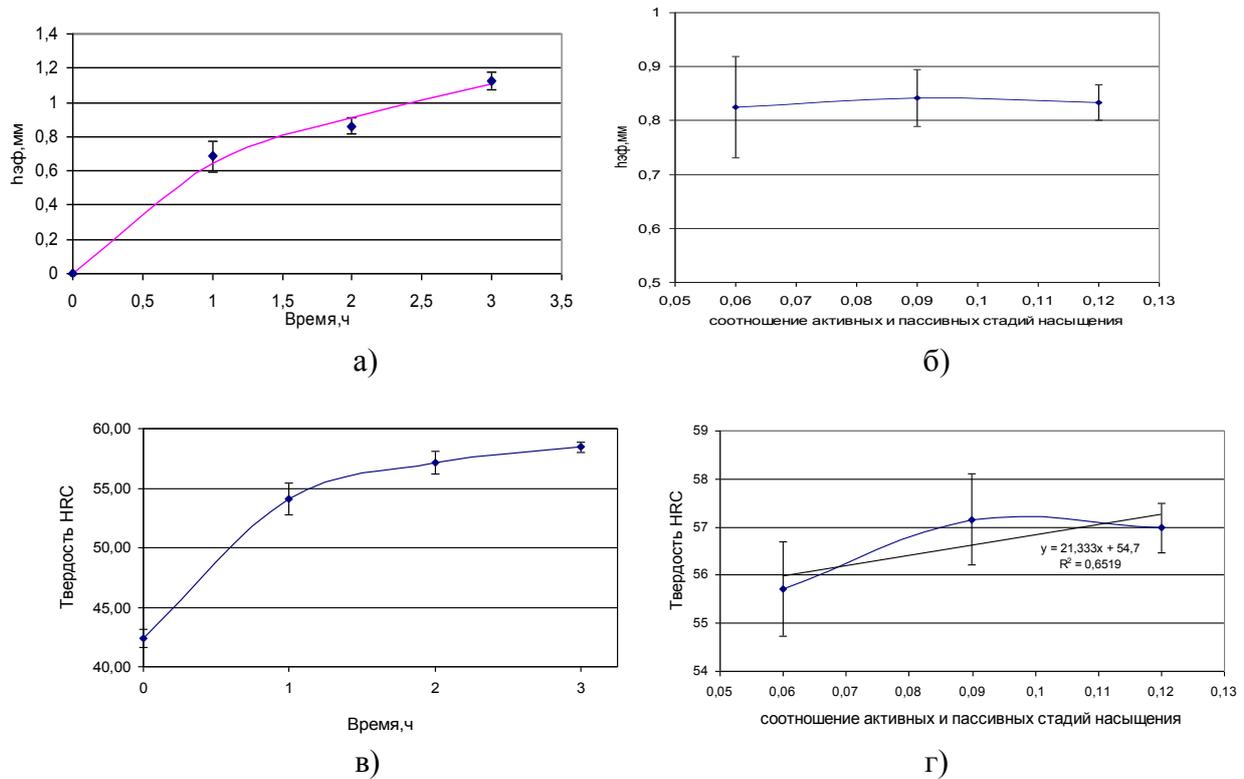


Рис. 2. Влияние времени насыщения (а, в) и соотношения времени активных и пассивных стадий цикла (б, г) на эффективную толщину слоя (а, б) и твердость поверхности (в, г) стали ВКС-10 после вакуумной цементации (920 °С) и упрочняющей термообработки

Микроструктура стали после ВЦ, последующей упрочняющей ТО и шлифования (избыточные карбиды цементитного типа, мартенсит и дисперсные частицы специальных карбидов [4]) представлена на рис. 3.

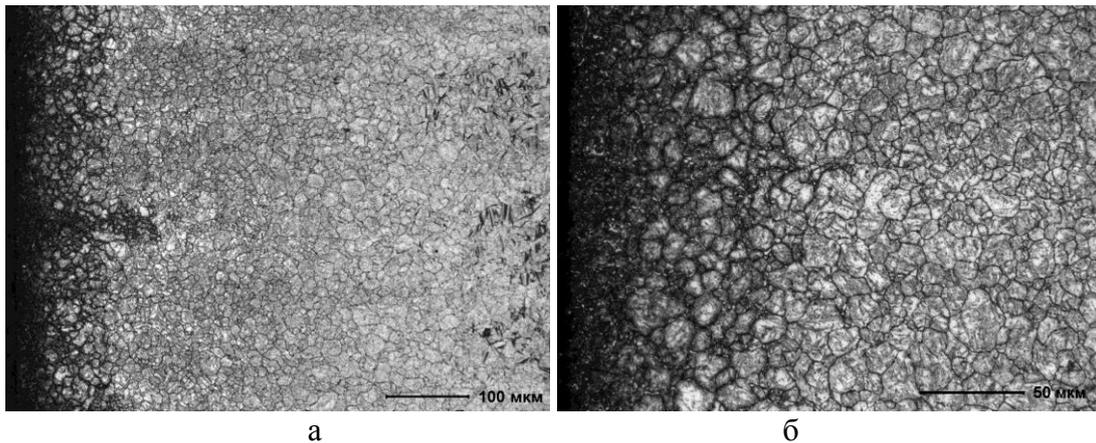


Рис. 3. Микроструктура стали ВКС-10 после ВЦ по режиму 920 °С, 2 часа, упрочняющей ТО и шлифования: а - $\times 200$; б - $\times 500$

При такой обработке формируется протяженный диффузионный слой (см. рис. 2, а, б), что способствует высокой контактной выносливости; при этом твердость поверхности имеет относительно невысокое значение (см. рис. 2, в, г).

Для дополнительного модифицирования поверхностного слоя применяли ионно-плазменное азотирование.

Здесь важно отметить, что температура ИА не превышает температуру последнего отпуска для стали ВКС-10 (см. рис. 1), что гарантирует отсутствие разупрочнения цементованного слоя и сердцевины при заключительном азотировании.

В процессе ионного азотирования происходит ряд процессов, связанных с насыщением поверхностного слоя азотом. Кроме насыщения твердого раствора азотом и образования нитридов легирующих элементов, происходит преобразование карбидов, сформировавшихся на этапе вакуумной цементации, в нитридные и карбонитридные фазы [5].

Микроструктура диффузионного слоя после ионно-плазменного азотирования представлена на рис. 4. Следует отметить, что при выбранном режиме азотирования на поверхности образца практически не образуется сплошной нитридный слой; названная структура обнаружена в виде отдельных фрагментов в периферийной части образца (рис. 5).

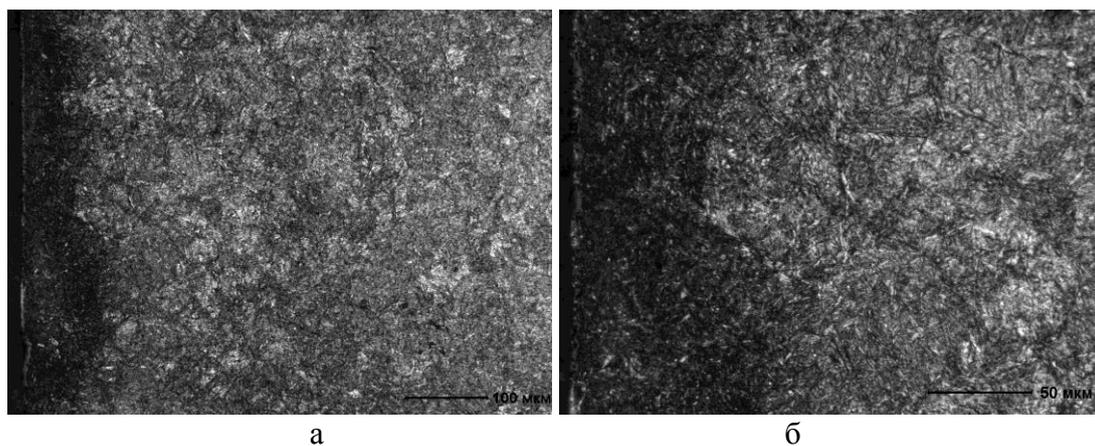


Рис. 4. Микроструктура стали ВКС-10 после ВЦ по режиму 920 °С, последующей упрочняющей ТО, шлифования и ионно-плазменного азотирования по режиму 500 °С: а - $\times 200$; б - $\times 500$

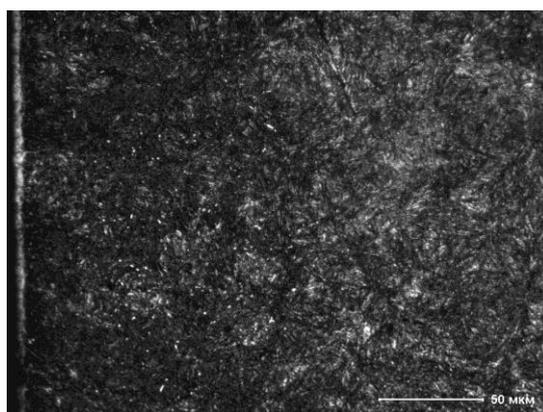


Рис. 5. Микроструктура стали ВКС-10 после ВЦ по режиму 920 °С, последующей упрочняющей ТО, шлифования и ионно-плазменного азотирования по режиму 500 °С; периферийная часть образца: $\times 500$

Мартенсит, насыщенный не только углеродом, но и азотом, нитридные и карбонитридные фазы легирующих элементов, определяют повышенную твердость тонкого приповерхностного участка диффузионного слоя, полученного ВЦ. При этом не зафиксировано разупрочнение насыщенного углеродом слоя и сердцевины стали (рис. 6).

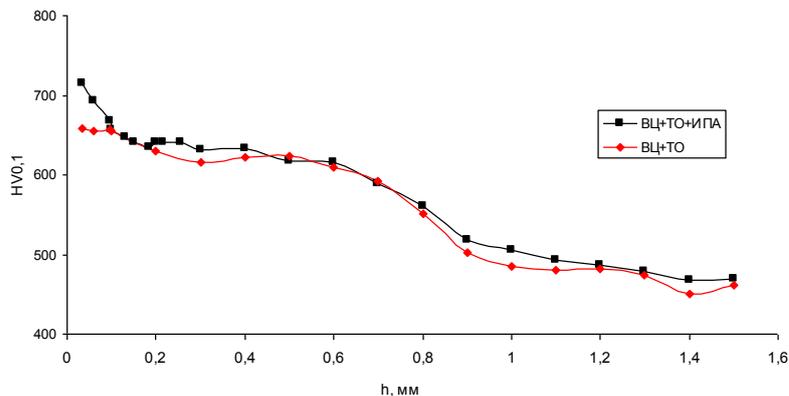


Рис. 6. Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя стали ВКС-10 после вакуумной цементации (920 °С, 2 ч) и упрочняющей термообработки (ВЦ+ТО) и вакуумной цементации (920 °С, 2 ч), упрочняющей термообработки и ионно-плазменного азотирования (500 °С, 10 ч) (ВЦ+ТО+ИПА)

Выводы

1. Установлена параболическая зависимость как эффективной толщины диффузионного слоя, так и твердости поверхности от общего времени насыщения; при этом соотношение времени активных и пассивных стадий цикла оказывает влияние в основном на приповерхностную часть диффузионного слоя, практически не изменяя эффективную толщину слоя.

2. Высокотемпературная ХТО – вакуумная цементация в сочетании с последующей упрочняющей термической обработкой дают возможность получения протяженного диффузионного слоя с высокой несущей способностью, что способствует обеспечению высокой контактной выносливости обрабатываемых изделий.

3. Возможность осуществления низкотемпературной обработки определяется высокой температурой (510 °С) заключительного отпуска стали ВКС-10.

4. Проведение на заключительном этапе (после шлифования для устранения геометрических искажений) низкотемпературной ХТО – ионно-плазменного азотирования, формирует на поверхности протяженного цементованного слоя относительно тонкий (около 0,12 мм) высокотвердый модифицированный слой, что способствует получению высокой износостойкости и сопротивления схватыванию.

Литература

1. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурич и др. – М.: Высшая школа, 2001. – 493 с.
2. Особенности вакуумной цементации теплостойкой стали в ацетилене / Н.М. Рыжов, А.Е. Смирнов, Р.С. Фахуртдинов и др. // МиТОМ.- 2004.- №6. – С. 10-15.
3. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. Управление насыщенностью углеродом диффузионного слоя при вакуумной цементации теплостойких сталей // МиТОМ.- 2004.- №8. – С. 22-27.
4. Лашнев М.М., Семенов М.Ю., Смирнов А.Е. Применение вакуумной нитроцементации для повышения сопротивления схватыванию зубчатых колес из стали ВКС-10 // МиТОМ.- 2013.- №1. – С. 29-33.
5. Герасимов С.А. Научные основы разработки технологических процессов азотирования конструкционных легированных сталей, обеспечивающих повышение работоспособности изнашивающихся сопряжений машин: дисс. ... докт. техн. наук – М., 1997. – 553 с.

УДК 621.793.74

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Наталья Сергеевна Наумова⁽¹⁾, Денис Александрович Александров⁽²⁾

Студент 5 курса⁽¹⁾, ведущий инженер ВГУП ВИАМ⁽²⁾

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.О. Базалева

кандидат наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Введение

Данная работа посвящена исследованию различных по составу износостойких покрытий. Данные покрытия находят свое применения в различных областях машиностроения и используются в различных парах трения и в режущем инструменте. Температурный диапазон работы таких покрытий в зависимости от задачи составляет от 200 до 800 °С. Одной из областей применения таких износостойких покрытий является авиационное двигателестроение. Газотурбинный двигатель (ГТД) имеет большое количество деталей, в том числе и пары трения, одни из которых являются щеточными или пальчиковыми уплотнениями.

Щеточные (или пальчиковые) уплотнения применяются для снижения утечки охлаждающего воздуха в турбине. Ликвидация непроизводительных утечек газа и охлаждающего воздуха представляет собой одну из наиболее важных и наиболее значительных по получаемому эффекту задач при проектировании турбины. Работа уплотнений происходит в контакте с титановыми и никелевыми роторами, разделяющими полости газоздушного тракта турбины и компрессора ГТД, приводя к износу роторов и увеличению зазора между ротором (валом) и уплотнительными элементами, что снижает эффективность работы уплотнительного соединения и приводит к потерям охлаждающего воздуха. Износ ротора или вала компрессора и турбины ГТД, работающих при высоких температурах и скоростях вращения, может привести к снижению их усталостной прочности и разрушению.

Для предотвращения утечки охлаждающего воздуха необходимо применять износостойкие покрытия, которые должны защитить детали вала и ротора ГТД, работающие в контакте со щеточными или пальчиковыми уплотнениями от износа. По данным отечественных и зарубежных источников, износостойкими высокотемпературными покрытиями можно считать покрытия, представляющие собой одно- или многослойные структуры из твердых материалов с КТЛР, близким к КТЛР основного материала, обладающие низким коэффициентом трения и хорошей обрабатываемостью, позволяющей получать шероховатость рабочей поверхности $R_a < 1$ мкм [3, 4, 6]. Такие покрытия имеют высокую адгезию к основному материалу и обладают достаточно высокой теплостойкостью, коррозионной стойкостью и износостойкостью. Основным методом нанесения износостойких покрытий является метод ионно-плазменного напыления.

В данной работе, исходя из износостойкости и рабочей температуры (450 °С), предпринята попытка подобрать покрытия оптимального состава для никелевого ЭП742 (Ni-14%Cr-10%Co-5%Mo-2%Nb-2.6%Al-2.6%Ti-0.08%С) и титанового ВТ8 (Ti-6.3%Al-3.3%Mo-0.3%Si-0.3%Fe-0.15%Zr-0.1%С) сплавов.

Исследуемые образцы

На исследуемые образцы никелевого ЭП742 и титанового ВТ8 сплавов нанесены системы износостойких высокотемпературных покрытий: TiNC, TiN (по различным технологиям), СДП-2 (Cr-20%, Al-12%, Y-0,5%), ВЖЛ-2 (Ni, Cr, W, Mo, Ti, Al), (ВЖЛ-2)С и

CrC+Cr. Нанесение покрытий проводилось на автоматизированной ионно-плазменной промышленной установке МАП-3 (рис. 1), оборудованной ионным ускорителем, позволяющим проводить имплантацию обрабатываемой поверхности и ассистированное осаждение упрочняющих покрытий ионами нейтрального или реактивного газов. Предварительно подготовленные к нанесению покрытия образцы (виброгалтовка и промывка в ультразвуковой ванне) устанавливаются в технологической оснастке на позиции вращения планетарного механизма. Камера вакуумируется до остаточного давления 10^{-1} Па. После включения электроприводов деталям сообщается планетарное вращение вокруг собственной оси и одновременно вокруг катода, который вместе с оправкой совершает возвратно-поступательное движение по вертикали, со скоростью 0,01 м/сек. Затем включаются катушки анода и электромагнитного фиксатора и на покрываемые детали подается отрицательный электрический потенциал. Возбуждение вакуумного дугового разряда между катодом и анодом достигается с помощью механизма зажигания, обеспечивающего кратковременный токовый контакт между поджигающим электродом и катодом.

Технологический процесс нанесения покрытий включал в себя следующие стадии: очистка обрабатываемой поверхности ионами металла покрытия при напряжении смещения на деталях 250-350 В и токе вакуумной дуги 500-700 А, стадию плазмохимического синтеза (осаждения покрытия в атмосфере реакционных газов ацетилена или азота при давлении) при напряжении смещения на деталях 150-180 В и давлении реакционного газа 0,2-0,6 Па.

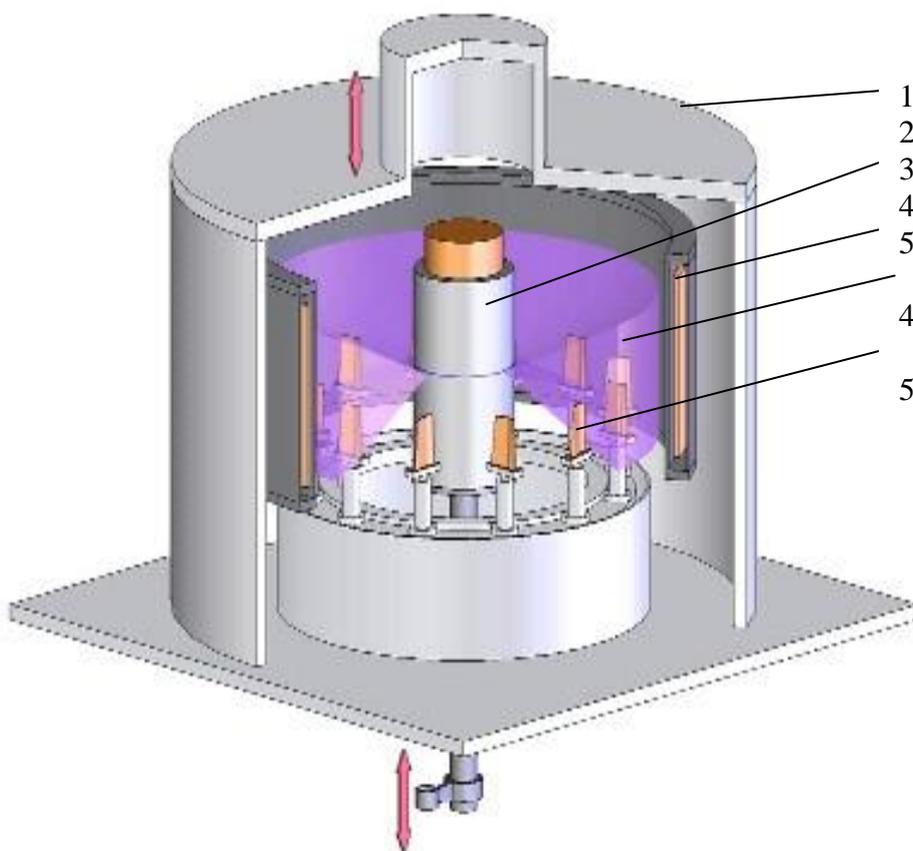


Рис. 1. Схема процесса ионно-плазменного нанесения покрытий в установке типа МАП:

1-вакуумная камера; 2 – трубный катод из испаряемого материала; 3- анод установки с магнитной катушкой; 4 – радиальный поток плазмы испаряемого материала; 5 – обрабатываемые изделия
Ожидаемое строение износостойких покрытий показано на рис. 2 (а, б).

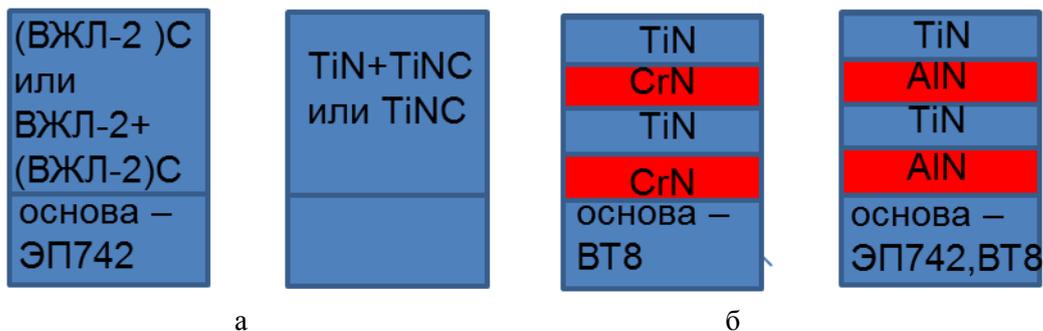


Рис. 2. Структура покрытий:

а - монослойные и комбинированные; б – нанослойные и микрослойные

Методика проведения испытаний

Структуру полученных покрытий исследовали методом металлографического анализа на оптическом микроскопе GX 500 фирмы Olympus при увеличениях 500 и 1000 крат. Поверхность образцов предварительно шлифовали и полировали.

Испытания покрытий на износ проводили при температуре 20 °С и 450 °С согласно ASTM G 99-05 на трибометре UMT-3 фирмы CETR (США), представленном на рис. 3.



Рис. 3. Трибометр UMT-3 фирмы CETR

Испытания проводили при следующих параметрах: время проведения испытания – 3600 с, температура испытаний – 20 и 450 °С, материал шарика контртела -карбид вольфрама, нагрузка – 10 Н, скорость вращения диска – 0,1 м/с. Условная схема испытания на износ показана на рис.4.

Износостойкость определяли механическим профилометром Hommel Tester T 500 (рис. 5). После проведения испытаний с помощью профилометра измерялась глубина дорожки, образца с покрытием и без него. Оценивали два параметра: линейный износ и износостойкость покрытия относительно основы - это отношение линейного износа основы к линейному износу покрытия.

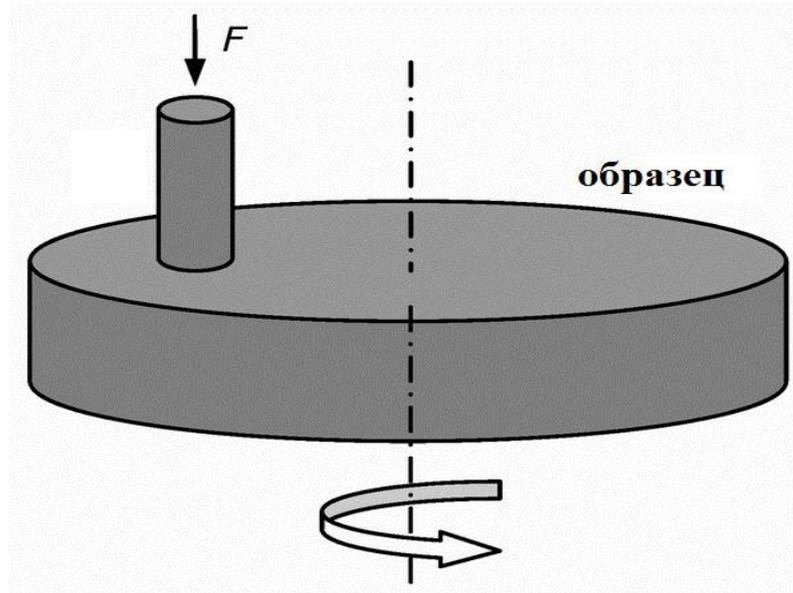


Рис. 4. Схема испытания на износ



Рис. 5. Профилметр Hommel Tester T 500

Результаты испытаний и их обсуждение

На рисунке 6 приведена структура исследуемых износостойких покрытий. Оптически была оценена толщина данных покрытий; значения толщин износостойких покрытий приведены в таблице 1.

Таблица 1. Толщина износостойких покрытий

Основа+покрытие	Толщина, мкм
BT8+TiNC	11
BT8+ВЖЛ-2	17
BT8+TiN	9
ЭП742+ ВЖЛ-2	22
ЭП742+ TiAlN	3

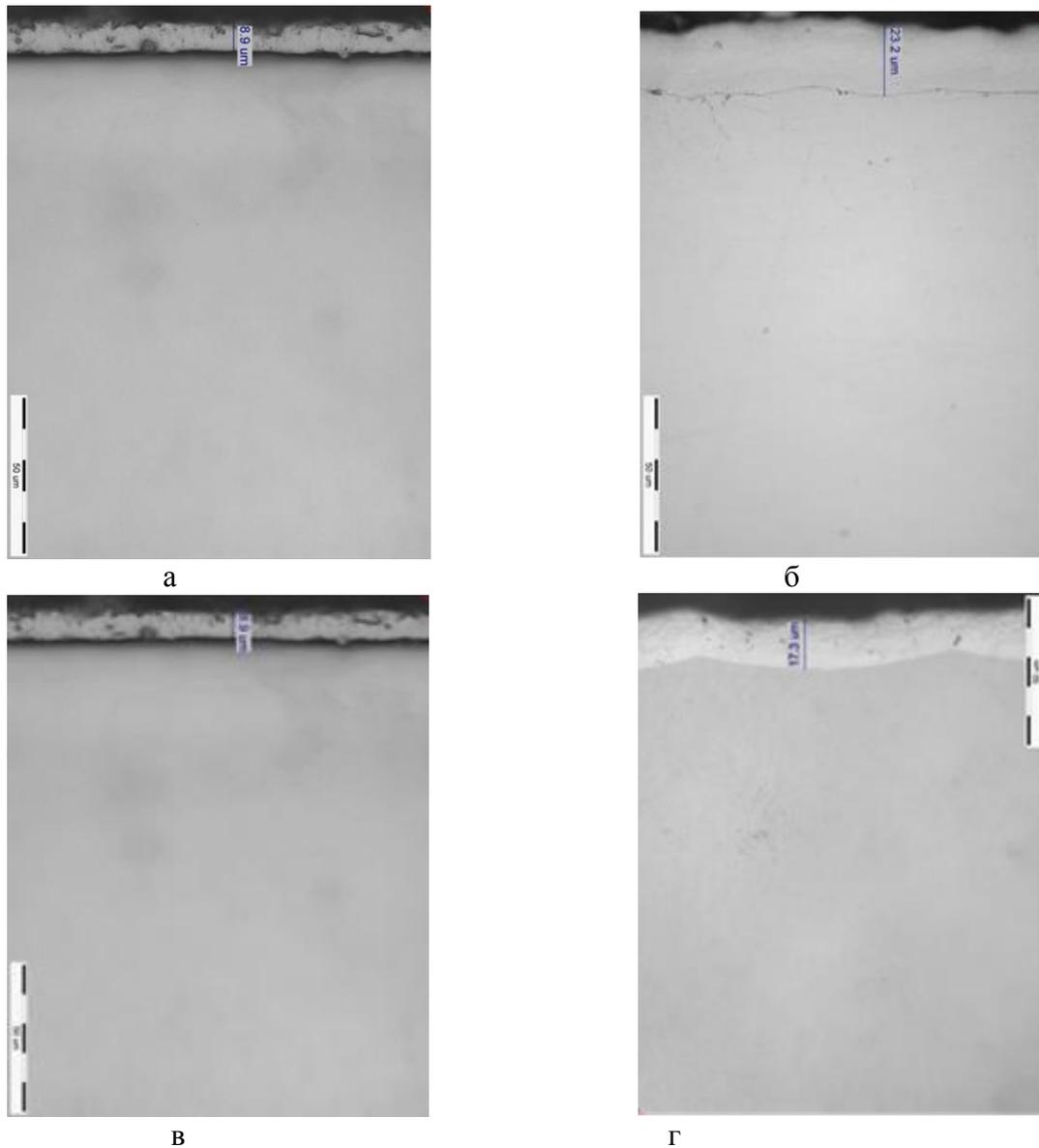


Рис. 3. Структура покрытий: а - покрытие TiN на сплаве BT8, x1000; б - покрытие (ВЖЛ-2)С на сплаве ЭП742, x 1000 ; в - покрытие TiNC на сплаве BT8, x 1000; г - покрытие ВЖЛ-2 на сплаве BT8, x1000

Результаты испытаний на износ приведены в таблице 2 и 3.

Таблица 2. Результаты испытаний на износ образцов титанового сплава BT8 с износостойкими покрытиями

Основа + покрытие	Тип обработки поверхности	Линейный износ, мкм (при 20° С /450 ° С)	Износостойкость покрытия относительно основы, раз
BT8, без покрытия	шлифовка	10/17	-
BT8+TiN-Ti-TiN	шлифовка	1/1	10/17
BT8+ВЖЛ-2*	шлифовка	8/10	1,25/1,7
BT8+TiNC	шлифовка	1/0,8	10/21,25
BT8+TiN	шлифовка	0,5/0,8	20/21,25

*-ВЖЛ-2(Ni, Cr, W, Mo, Ti, Al)

Таблица 3. Результаты испытаний на износ образцов никелевого сплава ЭП742 с износостойкими покрытиями

Основа + покрытие	Тип обработки поверхности	Линейный износ, мкм (при 20° С /450° С)	Износостойкость покрытия относительно основы, раз
ЭП742, без покрытия	шлифовка	15/15	-
Cr ₃ C ₂ -Cr	шлифовка	2/5	7,5/3
ВЖЛ-2	шлифовка	7/8	2,1/1,8
(ВЖЛ-2)С	шлифовка	1,5/1,5	10/10
СДП-2**	шлифовка	3/12	5/1,25
TiAlN	шлифовка	9/10	1,6/1,5

** - СДП-2 (Cr-20%, Al-12%, Y-0,5%)

Результаты испытаний на износ при 450 °С показывают, что наиболее износостойкими покрытиями на сплаве ВТ8 являются системы на основе титана: TiN+Ti+TiN, TiN, TiNC, повышающие износостойкость сплава ВТ8 в 17-21 раз. На образцах из сплава ЭП742 с покрытием (ВЖЛ-2)С достигнуто повышение износостойкости в 10 раз.

Выводы

1. Рассмотрены износостойкие покрытия для титанового сплава ВТ8 и никелевого сплава ЭП742. Оценка износостойкости проводилась при температурах 20 °С и 450 °С.
2. Наибольшая износостойкость при 20 °С получена у покрытия TiN для титанового сплава ВТ8, а для сплава ЭП742 у покрытия (ВЖЛ-2)С.
3. При температуре 450 °С лучшие результаты получили покрытия TiN, TiNC на основе титанового сплава и (ВЖЛ-2)С на основе никелевого сплава.

Литература

1. T.S. Li, H. Li, F.Pan. Microstructure And Nanoindentation Hardness Of Ti/Tin Multilayered Films // Surface Coating and Technology, 137 (2001), pp. 225-229.
2. Панфилов Ю.В., Беликов А.И., Гладышев И.В., Каменева А.Л., Демин Д.Ю., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Трофимова Л.А., Оборин А.П., Трофимов Е.М., Ужegov П.А. Наноструктурированные износостойкие многокомпонентные тонкопленочные покрытия, 2005, Упрочняющие технологии и покрытия, №4, с.30-34.
3. Углов В.В., Приходько Ж.Л., Ходасевич В.В., Приходько И.И., Эйзнер А.Б. Влияние состава на механические свойства покрытий, сформированных методом конденсации с ионной бомбардировкой, 2003, Физика и химия обработки материалов, №5, с.48-52
4. Каблов Е. Н., Мубояджян С. А., Будиновский С.А., Помелов Я. А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей, 1999 г. Конверсия в машиностроении 2, стр. 42-47.
5. Мигранов М. Ш. Триботехнические характеристики инструментов с износостойкими покрытиями. // [Уфимский государственный авиационный технический университет](#)// 2011-стр. 93-97.
6. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. – М.:Наука, 2006.-632 с.

УДК 539.4:678.067

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ СДВИГЕ ВДОЛЬ

Максим Андреевич Орлов⁽¹⁾ Пётр Викторович Михеев⁽²⁾

Аспирант 1 года⁽¹⁾

кафедра «МиТОМД»

Московский государственный машиностроительный университет «МАМИ»

Кандидат физико-математических наук⁽²⁾

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Р.Л. Шаталов

доктор технических наук, профессор кафедры «МиТОМД»

Аннотация

В данной работе экспериментально проверена возможность увеличения сдвиговых свойства ПКМ при армировании в поперечном направлении. Для увеличения прочности при сдвиге были использованы арамидные нити малого текста. Плоские плиты углепластика изготавливались методом вакуумной инфузии связующего. Нити тонкого текста при прошивке не нарушают структуру ПКМ. кроме того их использование нитей ПФТА вместо ПАБИ экономически выгодно.

Отработана методика прошивки слоев углеродной ткани арамидной нитью и последующей инфузионной пропитки сухого пакета. Показано, что прошивка приводит к увеличению сдвиговой прочности высокопрочного слоистого углепластика

Ключевые слова: углепластик, прошивка, арамид, вакуумная инфузия, прочность при сдвиге, углеродная ткань.

Введение

Современные композиционные материалы обладают рекордными прочностью и жесткостью при растяжении в направлении волокон, но очень низкими свойствами при сдвиге. Этот факт осложняет внедрение композиционных в современную промышленность [4].

Давно существовали предположения, что объединение слоев в поперечном направлении путем создания 3D структуры может повысить сдвиговую прочность [1, 2].

В случае тонкостенных (до 5 мм) конструкций для создания трехмерной структуры можно использовать прошивку слоев. И с другой стороны при создании больших тонкостенных конструкций для средств транспорта используются препреговые технологии с последующим отверждением в автоклаве, что делает прошивку практически неосуществимой.

Появление технологий пропитки сухого пакета связующим дает возможность осуществить прошивку армирующего материала до его пропитки связующим. В работе [3] приведены положительные результаты влияния прошивки арамидными волокнами ПАБИ на прочность углепластика после удара.

Ранее были сделаны попытки прошивать слои высокопрочных волокон полиамидными капроновыми нитями удобными для текстильной переработки, но обладающих низкой прочностью и модулем упругости.

В данной работе для прошивки слоев использованы высокопрочные арамидные волокна обладающие высокой прочностью и жесткостью. Для того чтобы снизить повреждение углеродной ткани при прошивке на использованы арамидные нити ПФТА (Армалон) линейной плотностью 7,9 текс.

Эксперимент

Объектом исследования данной работы являлись две группы плоских образцов. Образцы изготовлены методом вакуумной инфузии на основе однонаправленной углеродной ткани SAATITEXINDUSTRIAUC 350 (16 слоев) и низковязкого эпоксидного компаунда ЭТАЛ-ИНЖЕКТ-SL/Мпо ТУ 2257-3570-18826195-03. Режим отверждения связующего соответствовал режиму, предусмотренному ТУ 2257-3570-18826195-03, а именно: 24 часа при температуре 23 ± 2 °С и 4 часа при температуре 75 ± 2 °С. Образцы первого типа – исходный материал; образцы второго типа – с прошивкой арамидной нитью).

При изготовлении многослойной преформы из углеродной ткани использовалась укладка с прошивкой. Данная преформа была выполнена на промышленной швейной машине JUKILZ-391 (Япония). Пакет состоял из 16 слоев материала, выкроенных из однонаправленной углеродной ткани SaatiUC350 под углом 0.

Для прошивки использовалась высокопрочная и высокомодульная нить Армалон, производства РФ. Так как пакет состоит из большого количества слоев (общая толщина пакета 6 мм), дополнительно использовалась водорастворимая подложка, которая улучшила качество строчки и предотвратила сдвиг слоев. Параметры строчки, указывались в техническом задании и составляли: длина стежка 4мм, расстояние между строчками 4 мм. Расстояние между строчками соблюдалось за счет нанесения на водорастворимую подложку линий прошивки.

Форма и размеры образцов для механических испытаний определялись ОСТ190199-75 «Материалы полимерные композиционные. Метод определения прочности при сдвиге методом испытания на изгиб» и приведены далее. Данный типоразмер образцов и методика испытаний, также соответствует стандарту ISO 14130.

Нить Армалон, использованная для прошивки образцов была исследована для уточнения ее механических свойств при растяжении Разрушающая нагрузка - 1,6 кг (вариация 16 %), Прочность 2888 МПа, (вариация 2,16 %), модуль упругости 127,57 ГПа (вариация 2,34 %) и предельная деформация – 2,61 % (вариация 1,84 %). Пример диаграммы деформирования арамидной нити, использованной для прошивки, приведен на рисунке 1

Испытание образцов

Объекты испытаний, непосредственно, перед проведением испытаний, проходили кондиционирование не менее чем в течение 16 ч при стандартной атмосфере 23/50, в соответствии с ГОСТ 12423-66 «Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)».

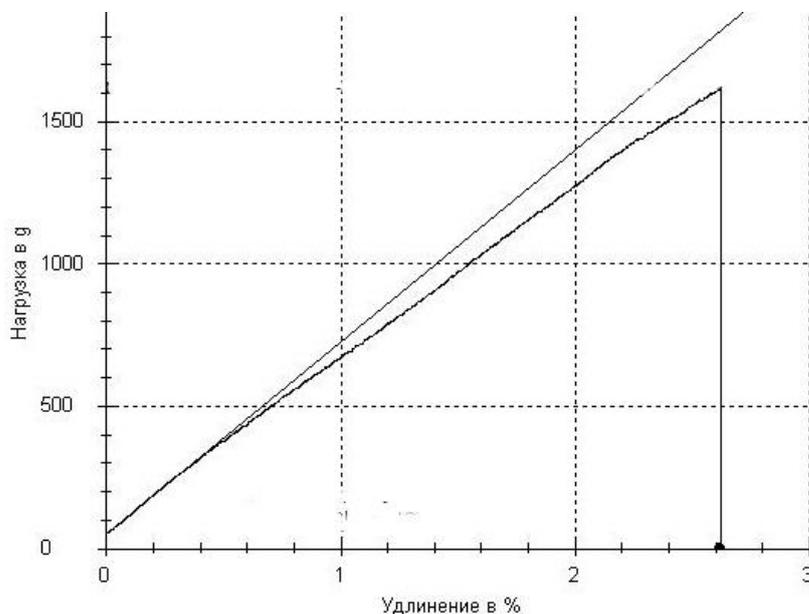


Рис. 20. Диаграмма деформирования нити Армалон при растяжении

Испытания проводили в условиях стандартной испытательной атмосферы 23/50 по ГОСТ 12423-66 «Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)» на испытательной машине, тип Zwick / RoellZ100 TEW, (Фирма "Zwick GmbH & Co. KG", Германия)

До начала нагружения (снятия кривой деформирования) образцы подвергали преднагрузке в размере 10 Н, что предусмотрено методикой проведения испытаний. Скорость нагружения образцов в процессе испытаний была постоянной и составляла 2 мм/мин. Ширина пролета между опорами при трехточечном изгибе составляла 30 мм. Радиус опор был равен 2 мм, а радиус нажимного пуансона – 5 мм.

Анализ данных

Диаграммы изгиба изготовленных образцов различных серий представлены на рис. 2 (непрошитые образцы) и рис. 3 (прошитые образцы). На рисунке 4 показано фото образца после испытаний

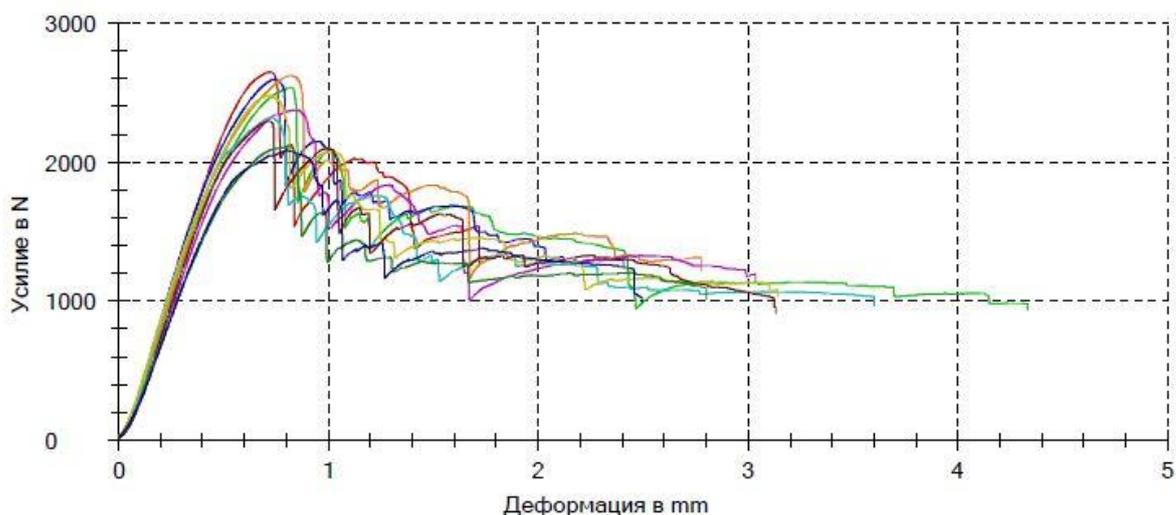


Рис. 21. Диаграмма изгиба без прошивки

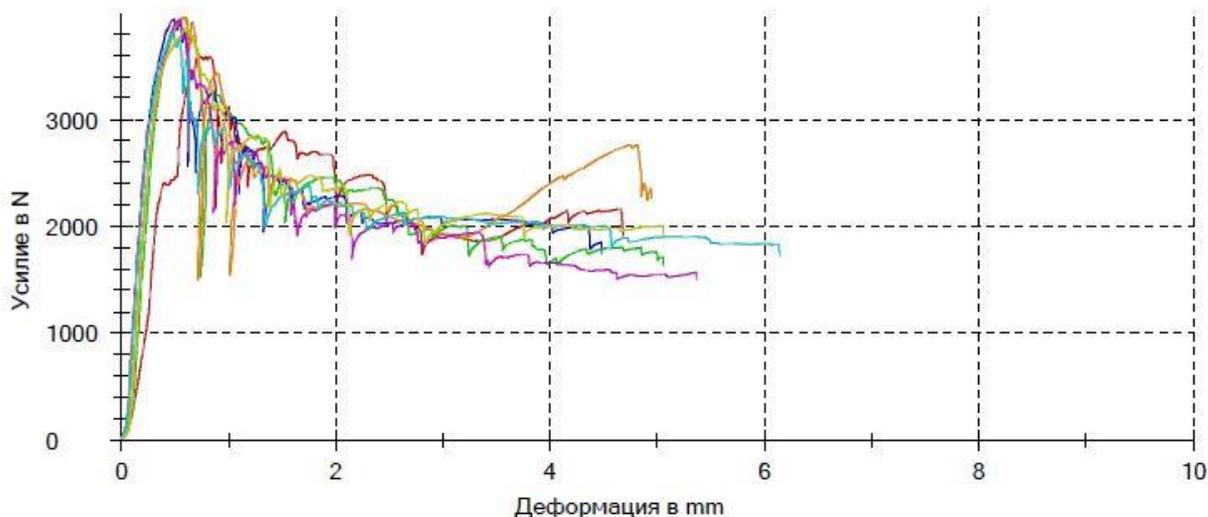


Рис. 22. Диаграммы изгиба образцов с прошивкой



Рис. 23. Образец углепластика с прошивкой арамидом после разрушения при сдвиге
На рисунке 5 приведены значение прочности непрошитых и прошитых образцов, значения приведены с доверительной вероятностью 64 %.

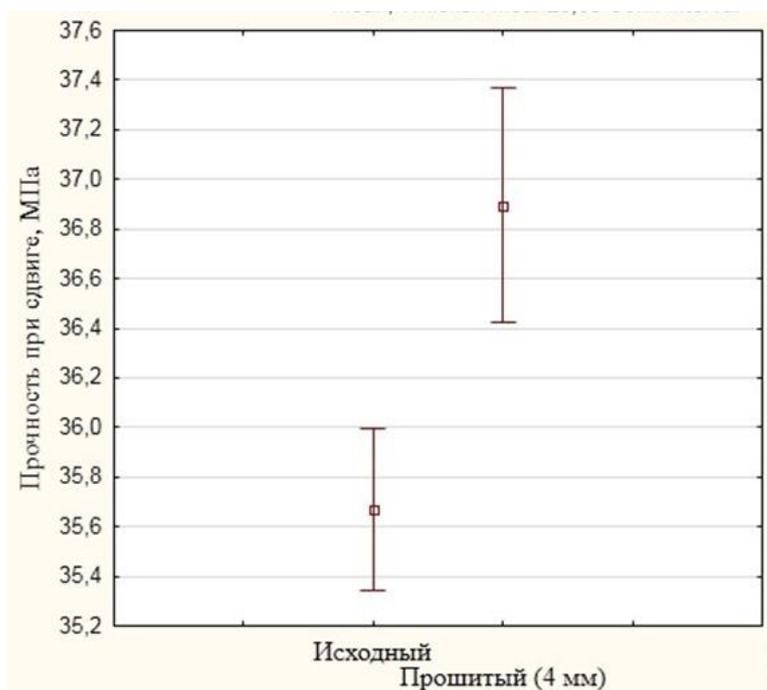


Рис. 24. Сравнение прочности при сдвиге прошитых и непрошитых образцов Среднее значения и разброс данных с доверительной вероятностью 65 %

Таким образом, в результате проведенных механических испытаний по определению прочности при сдвиге методом статического изгиба образцов углепластика двух различных серий получены следующие значения прочности при сдвиге τ : $35,66 \pm 3,15$ МПа – для исходного материала и $36,9 \pm 4,08$ МПа – для прошитого материала.

Выводы

Использование высокопрочных арамидных нитей для прошивки в сочетании с технологией вакуумной инфузии дает возможность повысить сдвиговую прочность углепластика, в том числе тонкостенных конструкций из него. Однако для уточнения полученных данных требуются дальнейшие исследования для подбора оптимального шага прошивки, и оптимизации текстильного процесса. Кроме того определенный эффект может дать использование более высокопрочных связующих в комбинации с прошивкой.

Литература

1. Жигун И.Г. , Поляков В.А. , «Пространственно-армированные пластины». – Рига: «Знание», 1978. - 215 с.
2. Куперман А.М., Зеленский Э.С. , « Исследование возможности увеличения прочностных характеристик композита путем их трехмерного армирования»// Механика композиционных материалов и конструкций. 2001. - Т.7. - № 4, С. 434-444.
3. Кавун Н.С., Давыдова И.Ф., Гребнева Т.В., Композиты и наноструктуры, Влияние прошивки стеклянного и углеродного армирующих волокон на остаточную прочность композиционного материала после удара //COMPOSITES and NANOSTRUCTURES, № 1, 2013, [678.84-419:677.521] 629.7.
4. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Экспериментально обоснование критериев прочности волокнистых композитов, проявляющих направленный характер разрушения, //Вестник ПНИПУ, 2012. – Механик. - № 2. - С.140-163.

УДК 621.77.01**ВОЗМОЖНЫЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗИРОВАНИЯ ПОРОШКА ALON**

Дмитрий Александрович Предейн

*Студент 4 курса**кафедра «Материаловедение»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: С.Д. Карпухин**кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»***Введение**

Оксинитрид алюминия (AlON) — соединение алюминия, кислорода и азота, которое представляет собой прозрачную керамическую твердую массу, прочность которой в четыре раза превосходит прочность закалённого стекла. Выпускается под торговой маркой ALON™, патент США № 4520116.

Таблица 1. Свойства ALON

Физические свойства	
Молярная масса	56.9877 г/моль
Плотность	3,688 г/см ³
Термические свойства	
Температура плавления	2140 °С
Оптические свойства	
Показатель преломления	1,78891
Структура	

Кристаллическая структура	кубическая шпинель: $Al(64+x)/3O32-xNx$ ($2.75 \leq x \leq 5$)
---------------------------	--

Оксинитрид алюминия [3] призван заменить довольно привычное пуленепробиваемое стекло. Однако на этом его функции не заканчиваются. Отполировав ALON, из него можно сделать стекло для иллюминатора, более того, его невозможно поцарапать привычными способами, а также он обладает отличной удароустойчивостью.

При всех этих показателях [5], ALON вдвое легче и тоньше чем обычное бронестекло. Также ALON используется как важнейший наружный слой экспериментальной прозрачной брони, которая разрабатывается ВВС США для окон бронированных машин.

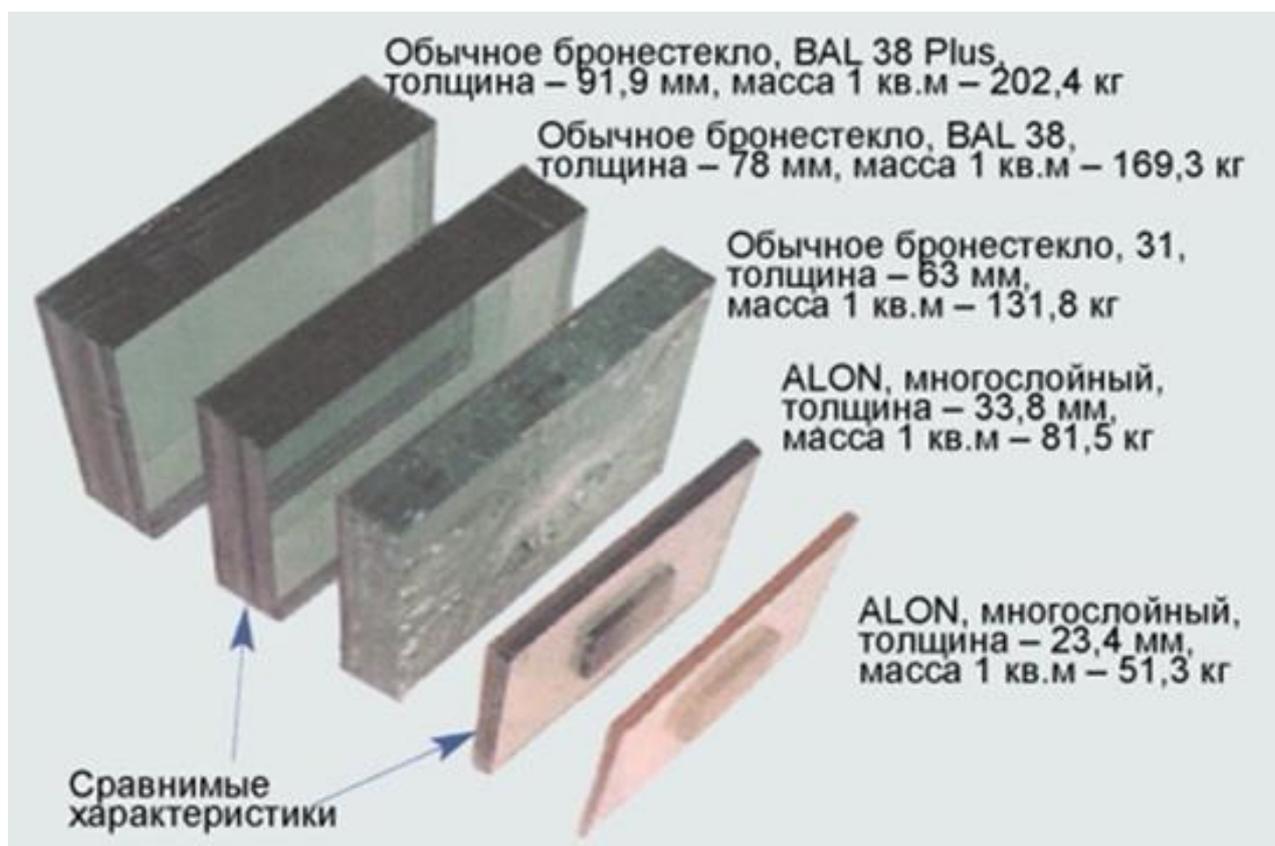


Рис. 1. Сравнение ALON и бронестекла

Компания Microsoft, в корпусе своей разработки «умные часы» применяет именно оксинитрид алюминия. Также он используется в качестве подложек для полупроводниковых интегральных микросхем, для изготовления осветительных приборов. Возможно, изготовление алюминиевых конструкций с использованием ALON-а уже не за горами, однако лишь в случае снижения стоимости материала.

По данным литературных источников [4] керамику из оксинитрида алюминия пытаются получать с применением разных технологических методов.



Рис. 2. Прозрачность ALON

Один из таких методов заключается в получении оксинитридной керамики путём синтеза тонкодисперсных порошков состава $Al_{23}O_{27}N_5$ с последующим их прессованием и спеканием. В то же время такой, традиционный для порошковой металлургии метод, является достаточно сложным и не всегда эффективным. Это обусловлено как чрезвычайно высокой стоимостью самого порошка, так и необходимостью применения при его компактировании высокозатратной технологии изостатического прессования под большим давлением (HIP), которая обеспечивает получение беспористой, высокоплотной структуры, а, следовательно, и высокую степень прозрачности материала. Поэтому важен поиск путей снижения стоимости материала за счёт использования более дешёвого исходного сырья и применения менее затратных технологий компактирования. Известен твердофазный синтез порошков $Al_{23}O_{27}N_5$, и метод прямого синтеза порошков металлического алюминия путём нитрирования в пламени горелки в газовой среде, содержащей смесь азот- и углеродсодержащих газов. Сведения о жидкофазных методах синтеза оксинитрида алюминия в открытой периодике отсутствуют. Используют также метод получения порошка оксинитрида алюминия, основанный на механическом измельчении порошковой смеси алюминия и оксида алюминия в азотсодержащей атмосфере до образования частиц из твердого раствора нитрида алюминия с оксидом алюминия с последующим нагревом смеси в атмосфере азота при избыточном давлении.

Альтернативный подход основан на синтезе оксинитрида алюминия из смеси порошков оксида алюминия и нитрида алюминия с рядом добавок. Однако указывается, что для полного завершения синтеза и обеспечения прозрачности материала процесс должен протекать под давлением и при высокой температуре довольно значительное время (от 6 до 16 часов). Использование исходных порошков с грубой морфологией приводит к формированию неоднородной поликристаллической структуры с заметной пористостью, что существенно ухудшает прозрачность изделия. Повышение температуры образца до точки плавления материала с целью устранения пористости, не приводит к положительному результату. Для разрешения данной проблемы в некоторых исследованиях предлагается вводить специальные добавки (иттрий и лантан и др.), которые должны способствовать улучшению процесса спекания. В ряде опытов был получен положительный эффект, но прозрачность изделий не поднималась выше 60% от полной прозрачности материала.

В результате анализа этих методов в лаборатории Института металловедения им. Байкова РАН была проведена экспериментальная оценка разных методов синтеза оксинитрида алюминия:

- жидкофазный синтез порошков оксинитрида алюминия с использованием органических соединений;
- спекание смеси из тонкодисперсных порошков Al_2O_3 и AlN , или смеси порошков алюминия и Al_2O_3 в атмосфере азота;
- спекание под давлением смеси порошков Al_2O_3 и AlN , полученных плазмохимическим синтезом.

Материалы и методики

Жидкофазный синтез проводился с использованием метода ультразвукового распылительного пиролиза. В данном случае процесс синтеза порошков оксинитрида алюминия с использованием органических соединений включал управляемую термическую деструкцию смеси компонентов с дальнейшей кристаллизацией полученного продукта при температурах 900-1350 °С. Были использованы методика гомогенизации компонентов в растворе, деструкция органики на воздухе с выдержкой при повышенной температуре, а также обжиг высушенного геля в потоке азота при температуре 1000 °С. В качестве исходных реактивов в работе использовались этилат алюминия $C_6H_{15}AlO_3$ поставка ALDRICH 97 %, $(NH_2)_2CO$ квалификации ЧДА, а также сахаразы $C_{12}H_{22}O_{11}$ ГОСТ 5833-75 для частичного «вскрытия» образующегося в процессе синтеза оксида алюминия. Для того, чтобы устранить образование промежуточных низкотемпературных соединений алюминия с гидроксильной группой ($AlOH$, $AlOON$, $Al(OH)_3$) в качестве растворителя применяли этиловый спирт. Для исследования приготавливали концентрационную серию растворов, варьируя содержание мочевины и сахаразы. Процесс синтеза осуществляли в 4 этапа.

1. Гомогенизация компонентов в растворе при температуре 50 °С в течение суток.

2. Процесс деструкции органики на воздухе с выдержкой при температуре 250 °С. На этом этапе в результате термического разложения алкоксида происходило окисление содержащегося в нем алюминия с присоединением атомов кислорода из воздуха и частичное первичное присоединение к продукту активного атомарного азота из разлагающейся мочевины. Деструкция сахаразы сопровождается образованием углерода, необходимого для "вскрытия" окислов алюминия при более высокой температуре.

3. Обжиг высушенного геля в токе азота. Температура обжига составляла 1000 °С, время выдержки 3 часа.

4. Обжиг образцов в токе азота с целью последующей кристаллизации структуры в полученном на предыдущем этапе аморфном геле. Состав синтезированных порошков исследовали с помощью рентгеноструктурного анализа.

Спекание смеси из тонкодисперсных порошков Al_2O_3 и AlN и смеси порошков алюминия и Al_2O_3 в атмосфере азота проводилось в диапазоне температур 1400-1800 °С. Исходные порошки Al_2O_3 получали методом ультразвукового распылительного пиролиза.

С использованием экспериментальной установки, представляющей собой вертикальную проходную печь с помещённым внутри неё кварцевым трубчатым реактором, была разработана и освоена технология синтеза наноструктурированных субмикронных сферических частиц. Максимальная температура нагрева активной зоны трубчатого реактора составляла 1000 °С. Аэрозольный туман, пропускаемый через реактор, формировался из рабочего раствора с помощью ультразвукового генератора с рабочей частотой 2,6 МГц. Для приготовления рабочего раствора был использован кристаллогидрат азотнокислого алюминия – $Al(NO_3)_3 \cdot xH_2O$, растворённый в дистиллированной воде. В связи с тем, что температуры в печи было недостаточно для полной кристаллизации частиц в порошке, был применён искусственный приём повышения температуры в микрокаплях аэрозоля за счёт

дополнительного тепла, выделяемого при экзотермической реакции. С этой целью в рабочий раствор добавлялся диамид угольной кислоты $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (мочевина), что приводило к возникновению экзотермической реакции с выделением дополнительного тепла, ускоряющего процесс фазовых превращений в синтезируемом материале. Для проверки спекаемости полученных порошков были изготовлены опытные образцы-таблетки.

Третий метод заключался в спекании смеси порошков Al_2O_3 и AlN (40:60) с активацией процесса спекания под давлением. В качестве исходных материалов использовались порошки, полученные методом плазмохимического синтеза (рис. 3) [1, 2].

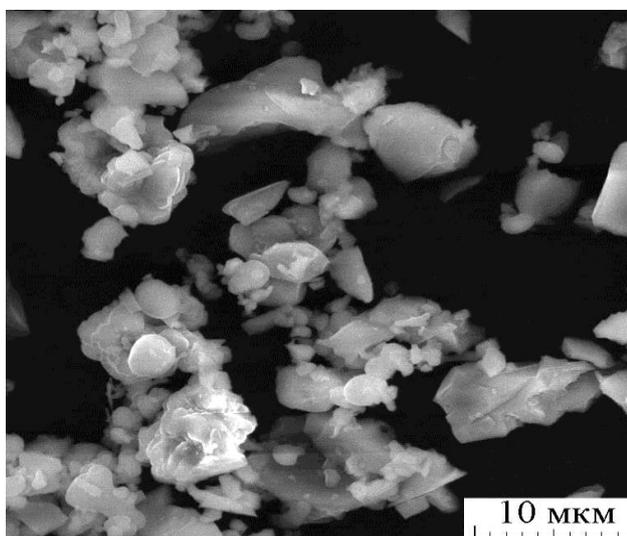


Рис. 3. Смесь порошков, полученных плазмохимическим синтезом: крупные порошокинки - Al_2O_3 , мелкие AlN

Такой метод очень производителен и позволяет получать чистые исходные продукты (99,95 %) (рис. 4).

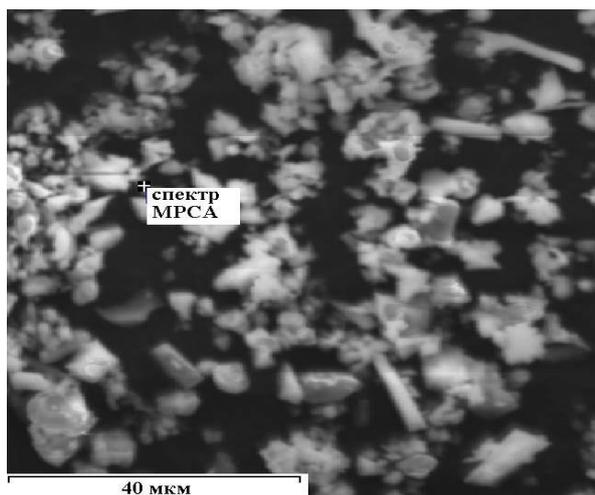


Рис. 4. Исследование частицы порошка Al_2O_3 , полученного плазмохимическим синтезом, с применением метода микрорентгеноспектрального анализа (МРСА)

Процесс спекания под давлением осуществляли в вакуумной камере при температурах 1650 и 1900 °С и давлении 200-270 кг/см². Время процесса варьировалось в пределах 10...12 мин. Температуры были выбраны для проверки литературных данных, согласно которым спекание смеси порошков проводится при температуре до 1700 °С. Графитовые пресс-формы для предотвращения влияния углерода были покрыты обмазкой из нитрида бора на спиртовой

основе. Вакуумную камеру подвергали двум последовательным циклам "продувка азотом – откачка" до остаточного давления $10^{-2} \dots 10^{-3}$ мм. рт. ст.

Результаты и их обсуждение

Жидкофазный синтез

Обнаружено, что данный метод чрезвычайно чувствителен к концентрационному соотношению в исходной смеси компонентов и к температурному режиму синтеза. Серия проведённых при разных температурах обжигов показало, что минимальной температурой старта кристаллизации является температура 1300 °С. Рентгеноструктурный анализ прошедших обработку образцов показал, что материал находится в аморфном состоянии. Результаты анализа указывают на то, что на данном этапе газообразный азот не является поставщиком структурно закрепленного азота в соединении, т.е. процесс азотирования как таковой произошел еще на предыдущих этапах термической гомогенизации раствора и разложения органики, где имелся атомарный азот - продукт разложения мочевины. Углерод - продукт деструкции сахарозы необходим здесь для окисления излишнего неструктурного кислорода. Кроме того, на этом этапе происходит более глубокое упорядочение атомов в локальных микрообъемах геля, что положительно сказывается при дальнейшей кристаллизации оксинитрида алюминия. Рентгеновская съемка образцов также выявила присутствие в большинстве из них помимо оксинитрида алюминия дополнительных фаз: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и AlN. Избежать появления этих фаз в конечном продукте удалось только в случае приготовления исходной смеси следующего состава: 1 моль алкоголята алюминия, 3 моля мочевины, 1 моль сахарозы. Установлено, что оксинитрид алюминия в азотной атмосфере стабилен от комнатной до температуры 1600 °С. Однако данный подход не является в настоящее время перспективным вследствие низких производительности и повторяемости результатов, а также высокой вероятности присутствия в конечном продукте ненужных фаз.

Спекание смеси порошков

Порошки, полученные методом ультразвукового пиролиза, представляли собой наноструктурированные частицы сферической формы со средним диаметром 0,75... 1,3 мкм (рис. 5).

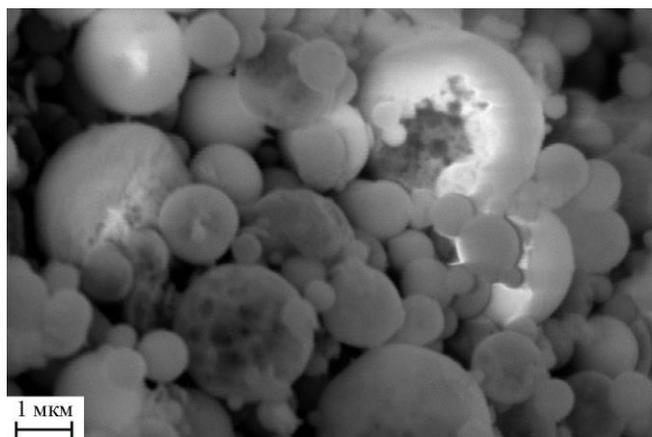


Рис. 5. Порошок Al_2O_3 , полученный методом ультразвукового пиролиза

При этом отсутствовало образование многочастичных трудно разрушимых агломератов частиц, а наличие в частицах разветвлённой сети межнофрагментарных границ, обеспечивает порошкам при спекании повышенную активность, сопоставимую с активностью ультрадисперсных порошков.

Исследование спекаемости формовок из смеси показали, что оптимальная температура спекания, при которой максимальная плотность получаемого материала достигла 99,2 % (рис. 6), располагается вблизи значения 1550 °С. Недостатки данного подхода в целом были аналогичны предыдущему.

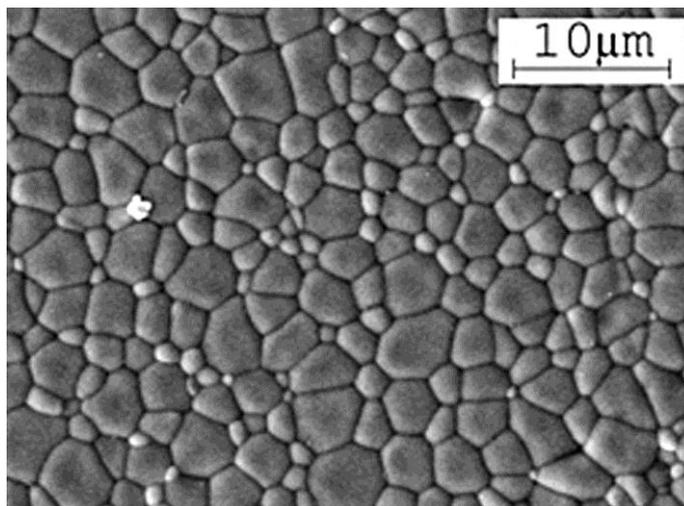


Рис. 6. Материал с плотностью 99,2%, спеченный из порошков, полученных методом ультразвукового пиролиза

Спекание под давлением

При данном подходе были получены таблетки толщиной 5...6 мм и диаметром 30...60 мм. После проведения процесса полученные таблетки подвергались шлифовке. Время выдержки не оказывало влияние на процесс спекания. Образцы полученные при температуре вблизи 1700 °С показали неплохие механические свойства: предел прочности на изгиб $\sigma_{и} = 115...140$ МПа, вязкость разрушения $K_{Ic} = 3,9...4,6$ МПа·м^{-1/2}, микротвердость HRC = 700...1200. Если сравнивать с показателями, обычно приводимыми для керамики типа ALON, то оказывается, что полученный материал в 2...2,4 раза превосходит его по значениям K_{Ic} , сопоставим с ним по твердости и примерно в 2 раза уступает по прочности на изгиб. На разброс механических свойств и их уровень негативное влияние оказывает обнаруженное наличие пористости. Рентгенографические исследования показали, что полученный материал представляет собой композит 49 % AlN - 52 % Al₂O₃, но без присутствия фазы Al₂₃O₂₇N₅. Более подробные исследования, проведенные методом дифракции и анализа электронограмм, позволили установить, что в материале присутствуют две фазы типа Al-N-O. Одна из которых соответствует аналогу Al₂₃O₂₇N₅ - Al₂₈O₃₅N₅ в кристаллической и аморфной форме. Исходя из этого можно сделать вывод, что процесс синтеза Al₂₃O₂₇N₅ при указываемом в литературе значении температуры 1700 °С только начинается, а для его завершения требуются большие значения, которые позволят также значительно снизить пористость. Этот вывод подтвердили положительные результаты спекания при 1900 °С. Образцы, полученные в результате спекания, отличались темным оттенком цвета (рис. 7), что связано с наличием в них углерода.

Применение обмазки, предотвращая прямую диффузию в твердой фазе углерода из графитовых пресс-форм в образцы, но не позволяет устранить диффузию через газовую фазу. Увеличение температуры спекания приводит к увеличению переноса углерода в образец. Таким образом, указанный метод продемонстрировал свое преимущества перед двумя другими. Его перспективность заключается и в том, что производительность метода плазмохимического синтеза достаточно велика для организации в последующем серийного производства керамики на основе Al₂₃O₂₇N₅. Для устранения выявленных недостатков данного метода необходимо проведение дальнейших исследований в направлении устранения из технологии графита и использования температур в интервале 2000...2100 °С. Повышение температур и, возможно, использование дополнительных методов активации процесса спекания (химического, плазменного и др.) позволит получать изделия из рассматриваемой керамики без применения давления. Это позволит исключить влияние материала пресс-форм и получать изделия сложной формы.

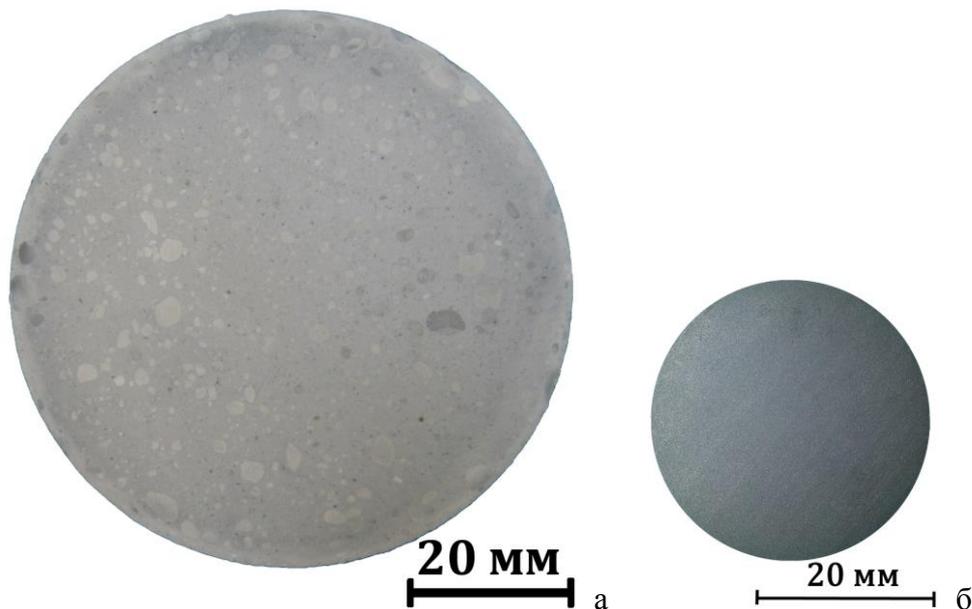


Рис. 7. Образцы, полученные спеканием под давлением из смеси порошков $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{AlN}$: а) при $1650\text{ }^\circ\text{C}$, б) при $1900\text{ }^\circ\text{C}$

Выводы

1. Сведения по синтезу оксинитрида алюминия, приводимые в открытой печати, весьма противоречивы и могут частично не соответствовать действительности. Особенно это касается данных по конкретным технологическим режимам синтеза.

2. Наиболее перспективным подходом для синтеза керамических изделий на основе оксинитрида алюминия в настоящее время можно рассматривать спекание смеси порошков $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{AlN}$ или непосредственно порошка $\text{Al}_{23}\text{O}_{27}\text{N}_5$, полученных методом плазмохимического синтеза (или аналогичного по производительности и чистоте получаемых продуктов).

3. Для получения требуемого набора эксплуатационных характеристик необходимо использовать активацию процесса спекания, применять атмосферу азота, в том числе при пониженном остаточном давлении, устранять из технологического пространства оборудования углеродные материалы, проводить процесс спекания в диапазоне температур $2000\text{...}2100\text{ }^\circ\text{C}$.

Литература

1. Цветков Ю.В., Самохин А.В. Плазменная нанопорошковая металлургия. Киев: Автоматическая сварка, 2008.
2. Цветков Ю.В. Самохин А.В., Алексеев Н.В. Плазмохимические процессы создания нанодисперсных порошковых материалов // Химия высоких энергий, 2006. Т.40, №2. С.120-126.
3. Необычный прозрачный алюминий — Transparent Aluminum Oxynitride. <http://www.sciencedebate2008.com/unusual-aluminum/>
4. Получение оксинитридной керамики из порошка, полученного полуплазмохимическим синтезом // Колмаков А.Г., Антипов В.И., Самохин А.В., Просвирнин Д.В., Алексеев Н.В., Аникин В.Н., Вепринцев К.В., Синельников А.А., Куфтырев Р.Ю., Баранов Е.Е., Лецинская К.В., стр. 3, 4.
5. Surmet_ALON_Paper_for_2010_EMWS final. Page 2, Table 1. "Typical Properties of ALON® Optical Ceramics. <http://www.surmet.com>.

УДК 621.785.52

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ТЕПЛОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ

Герман Сергеевич Севальнёв

*Студент 6 курса**кафедра «Материаловедение»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: А.Е. Смирнов**кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»***Введение**

В настоящее время в авиационном машиностроении активно используются комплексно-легированные теплостойкие стали для таких ответственных деталей, как шестерни газотурбинных двигателей, подвергающиеся высоким нагрузкам и скоростям скольжения. Для хорошей работоспособности данных деталей необходимо повышать их основополагающие свойства: контактная выносливость, износостойкость, сопротивление усталостному разрушению при изгибе и заедании. Одним из способов повышения этих свойств является химико-термическая обработка [3, 4]. Теплостойкие стали являются комплексно-легированными, поэтому при проведении вакуумной цементации необходимо повысить такие параметры диффузионного слоя, как эффективная толщина и концентрация углерода на поверхности. Для увеличения этих параметров следует провести обработку давлением для создания наиболее дефектной структуры в стали. Одним из таких способом является теплая пластическая деформация, которую проводят ниже температуры рекристаллизации стали [1, 2].

Цель данной работы – установление влияния тепловой пластической деформации и вакуумной цементации на структуру и параметры диффузионных слоев теплостойких сталей.

Методика исследований

Исследования проводили на теплостойкой стали 16Х2Н3ФБАЮ-Ш (ВКС-7) и ВКС-10 (13Х3Н3М2ВФБ-Ш). Химический состав сталей представлен в таблице 1. Для насыщения поверхности использовали одностадийные и двухстадийные режимы вакуумной цементации при температуре 940 °С и постоянном давлении насыщения 6 мм. рт. ст.

Таблица 1 Химический состав исследуемых сталей (масс. %)

ВКС-7	С	Cr	Ni	Mo	Mn	W	Si	V	Nb	Al	S	P
	0,14	1,80	2,70	0,40-	0,30-	0,20-	0,17-	0,10-	0,10	0,02-	Не	Не
	-	-	-	0,60	0,60	0,30	0,37	0,20	-	0,07	более	более
	0,18	2,20	3,00						0,20		0,015	0,025
ВКС-10	С	Cr	Ni	Mo	Mn	W	Si	V	Nb	Al	S	P
	0,10	3,00	2,70	1,90-	0,30-	0,20-	0,17-	0,05-	0,05	Не	Не	Не
	-	-	-	2,30	0,60	0,50	0,37	0,15	-	более	более	более
	0,15	3,40	3,00						0,15	0,04	0,015	0,015

Одностадийные режимы:

- 1) Активная стадия $\tau_a = 2$ мин; пассивная стадия τ_p отсутствует;
- 2) Активная стадия $\tau_a = 4$ мин; пассивная стадия τ_p отсутствует;
- 3) Активная стадия $\tau_a = 6$ мин; пассивная стадия τ_p отсутствует.

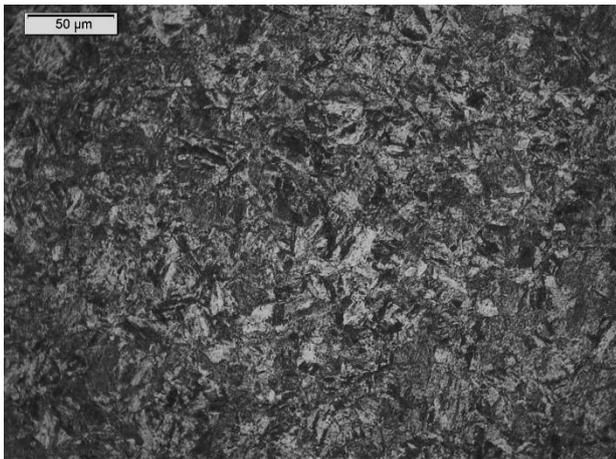
Двухстадийные режимы:

- 1) Активная стадия $\tau_a = 4$ мин; пассивная стадия $\tau_p = 20$ минут;
- 2) Активная стадия $\tau_a = 4$ мин; пассивная стадия $\tau_p = 40$ минут.

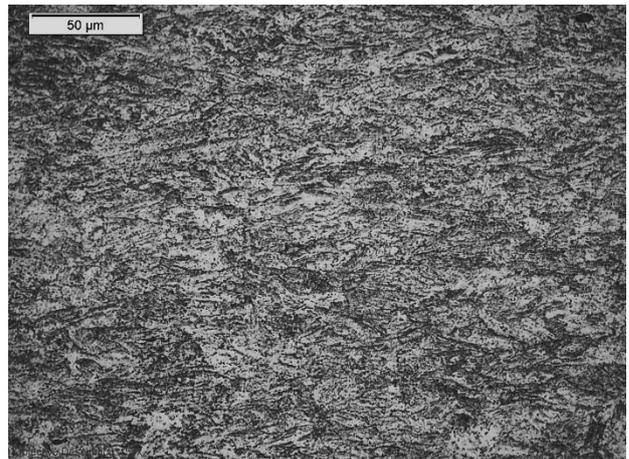
Исследование микроструктуры теплостойких сталей после вакуумной цементации проводили с помощью оптического микроскопа «OLYMPUS GX-51» при увеличении 500 крат. Для определения микротвердости и эффективной толщины диффузионного слоя использовали микротвердомер «DURASCAN-20» фирмы «STRUERS» с приложенной нагрузкой 50 г.

Результаты исследований и их обсуждение

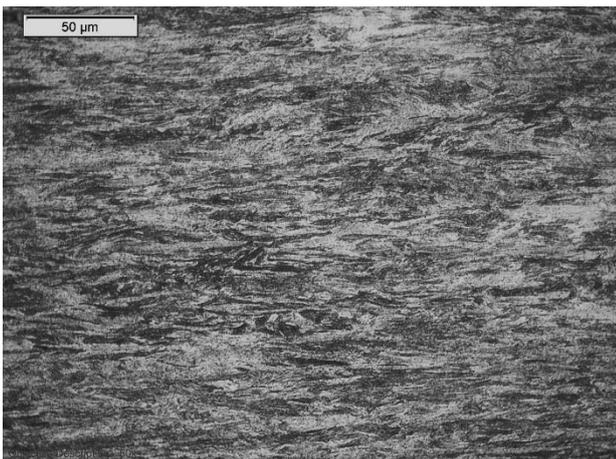
На рисунках 1 и 2 представлены микроструктуры теплостойких сталей ВКС-7 и ВКС-10 после теплой пластической деформации.



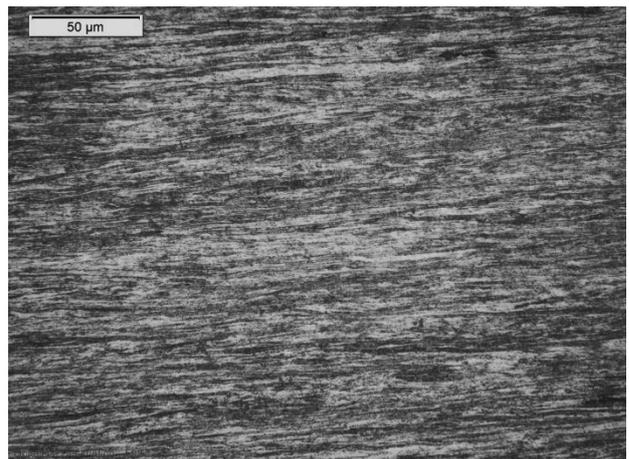
а



б



в

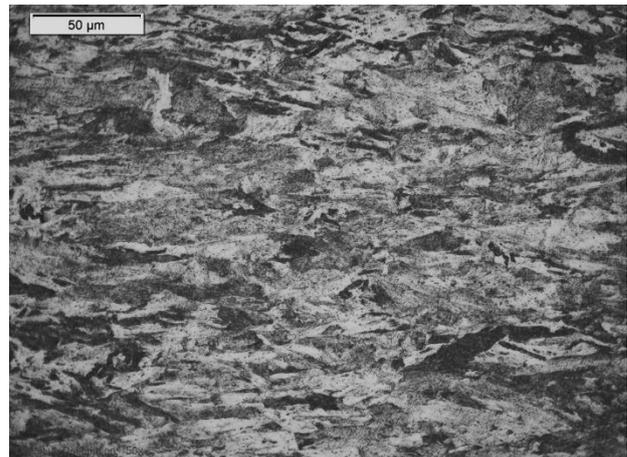


г

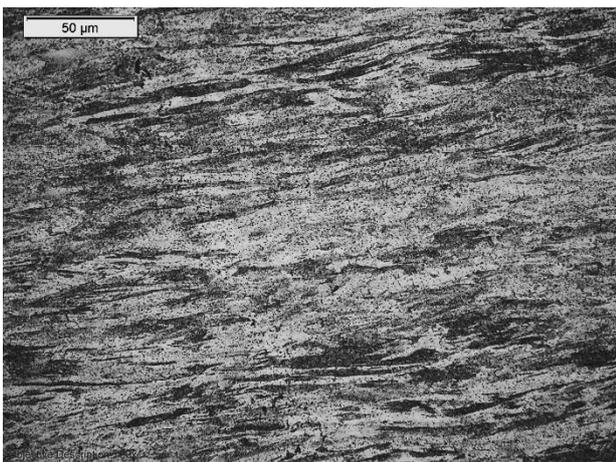
Рис.1. Микроструктуры стали ВКС-7: а - в исходном состоянии; б - после ТПД ($\epsilon = 40\%$); в - после ТПД ($\epsilon = 60\%$); г - после ТПД ($\epsilon = 80\%$), $\times 500$



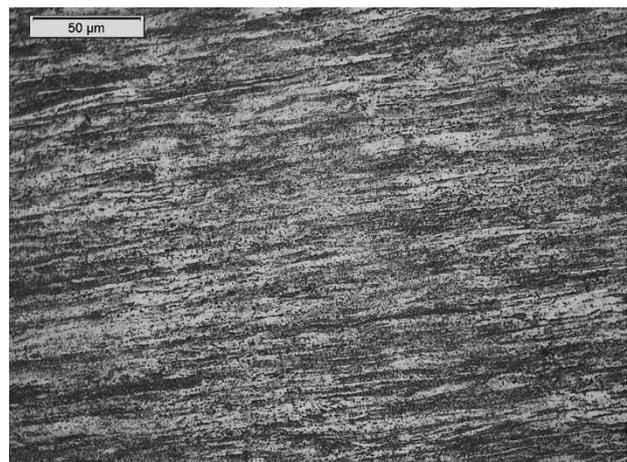
а



б



в



г

Рис. 2. Микроструктуры стали ВКС-10: а - в исходном состоянии; б - после ТПД ($\epsilon = 40\%$); в - после ТПД ($\epsilon = 60\%$); г - после ТПД ($\epsilon = 80\%$), $\times 500$

После теплой пластической деформации видна вытянутость структуры вдоль направления прокатки. Т.к. микроструктура после степеней деформации $\epsilon = 60\%$ и $\epsilon = 80\%$ не имеет значительных отличий, то для последующих режимов вакуумной цементации подобраны образцы со степенями пластической деформации $\epsilon = 0\%$; 40% ; 80% .

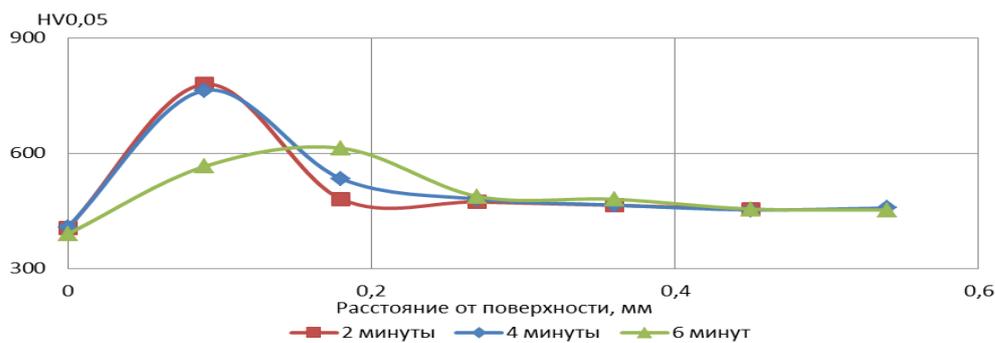


Рис. 3. Изменение микротвердости по толщине диффузионного слоя

На рисунке 3 представлены графики изменения микротвердости стали ВКС-10 по толщине образца. При увеличении активной стадии карбидная фаза начинает активно стабилизировать аустенит на поверхности, тем самым снижая твердость. Дальнейший вклад в увеличение микротвердости вносят мартенсит и карбидная фаза.

На рисунке 4 представлена микроструктура теплостойкой стали ВКС-10 после вакуумной цементации, проведенной по одностадийным режимам. Анализ микроструктуры подтверждает, что увеличение времени активной стадии цикла приводит к росту протяженности диффузионного слоя и концентрации углерода на поверхности образца, а также к стабилизации остаточного аустенита на поверхности.

По результатам измерения микротвердости при таких режимах насыщения были получены следующие значения эффективной толщины диффузионного слоя $h_{эф}$:

- 1) Активная стадия 2 минуты – эффективная толщина 0,18 мм;
- 2) Активная стадия 4 минуты – эффективная толщина 0,22 мм;
- 3) Активная стадия 6 минут – эффективная толщина 0,26 мм.

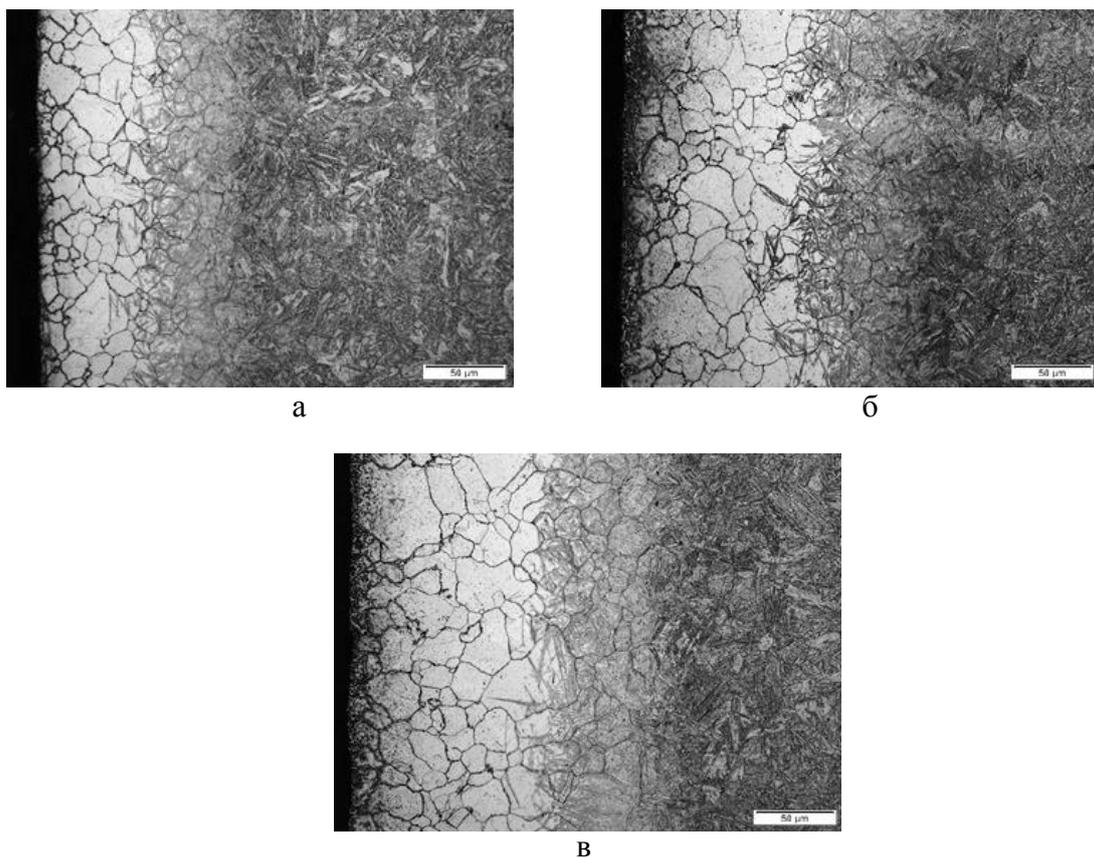


Рис. 4. Микроструктуры стали ВКС-10 после одностадийных режимов вакуумной цементации: а - активная стадия $\tau_a = 2$ мин; б - активная стадия $\tau_a = 4$ мин; в - активная стадия $\tau_a = 6$ мин, $\times 500$

При проведении двухстадийного режима насыщения карбидная фаза начинает распределяться по толщине диффузионного слоя (рис.5). Вклад в снижение твердости также вносит остаточный аустенит на поверхности.

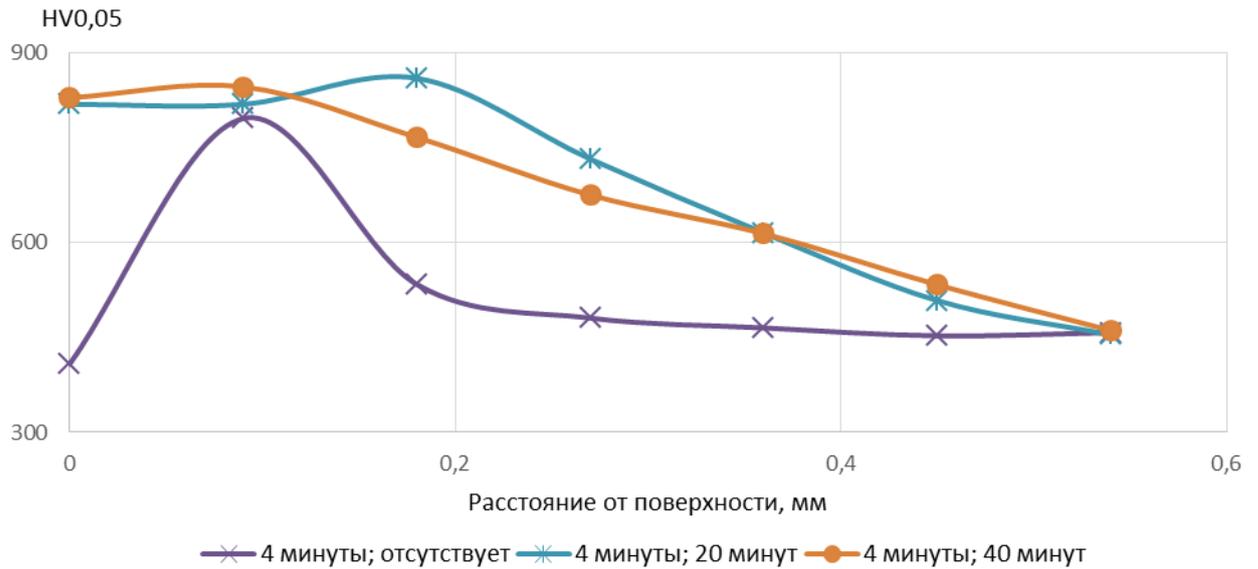


Рис. 5. Изменение микротвердости по толщине диффузионного слоя

На рисунке 6 представлена микроструктура теплостойкой стали ВКС-10, насыщенная по двухстадийным режимам.

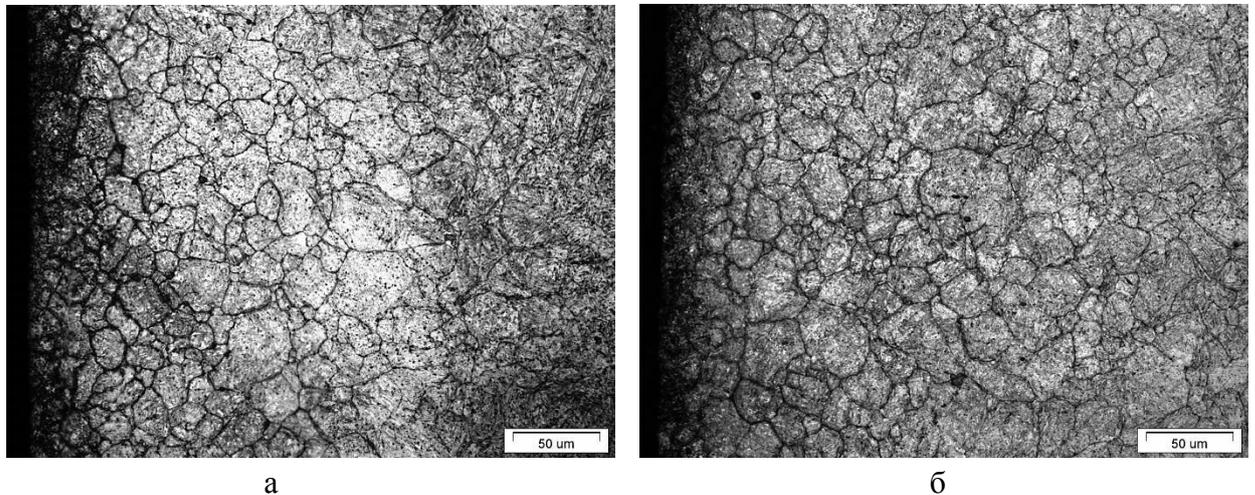


Рис. 6. Микроструктуры стали ВКС-10 после двухстадийных режимов вакуумной

цементации: а - активная стадия $\tau_a = 4$ мин, пассивная стадия $\tau_n = 20$ мин; б - активная стадия

также

$\tau_a = 4$ мин. пассивная стадия $\tau_n = 40$ мин. $\times 500$

время, концентрация углерода на поверхности снизилась. При добавлении пассивной стадии также возросла эффективная толщина диффузионного слоя:

- 1) Активная стадия 4 минуты, пассивная 20 минут – эффективная толщина 0,45 мм;
- 2) Активная стадия 4 минуты, пассивная 40 минут – эффективная толщина 0,50 мм.

При построении графика зависимости эффективной толщины диффузионного слоя от общего времени насыщения мы получаем классический вид параболы (рис. 7).

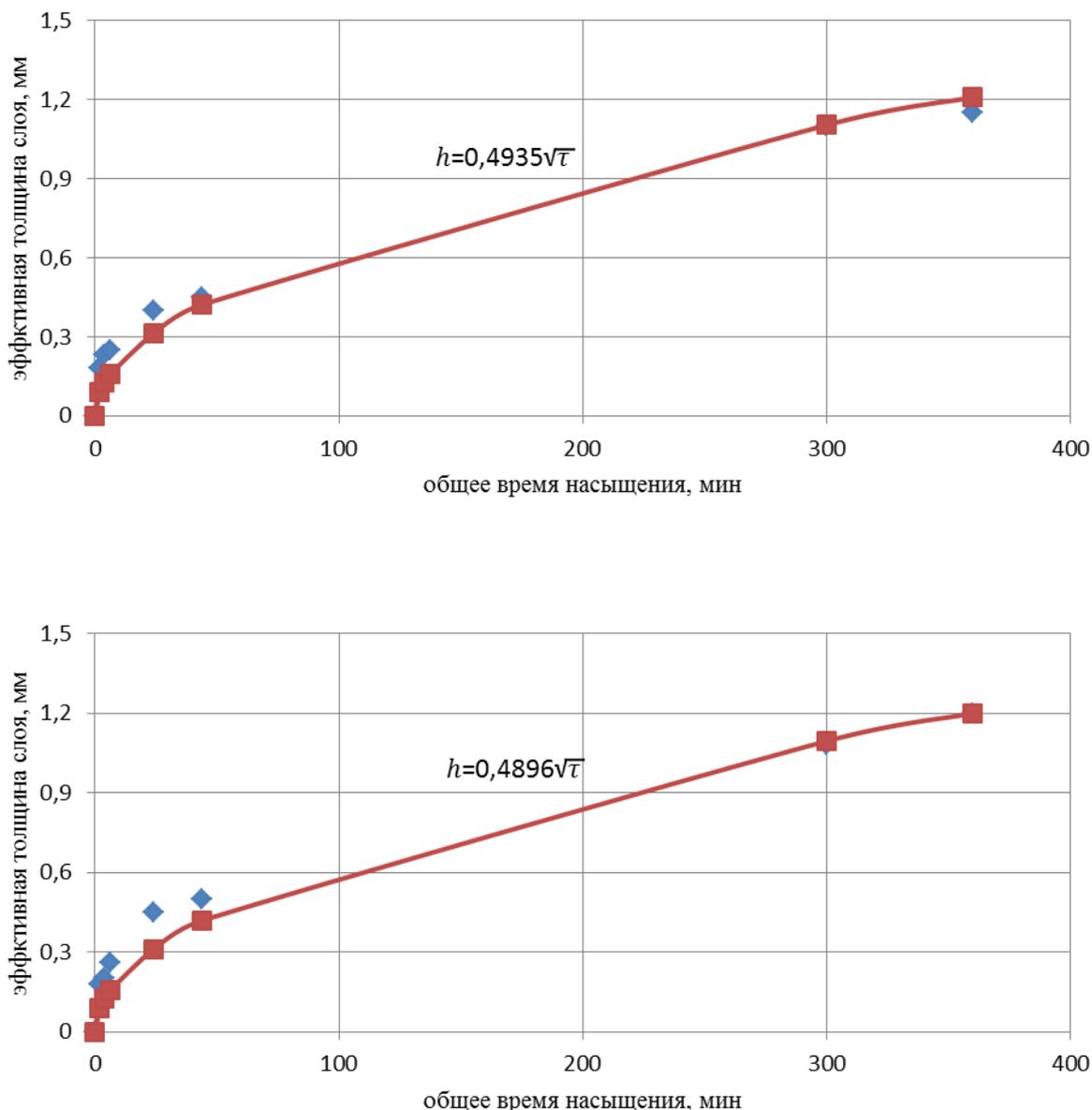


Рис. 7. Графики зависимости эффективной толщины диффузионного слоя от общего времени насыщения: а – сталь ВКС-7; б – сталь ВКС-10

Зависимость эффективной толщины диффузионного слоя от общего времени насыщения описывается формулой $h = k\sqrt{\tau}$, где k – кинетический коэффициент, τ – общее время насыщения. Для стали ВКС-7 кинетический коэффициент $k = 0,4935$, а для стали ВКС-10 $k = 0,4896$.

Выводы

1) Проведены исследования влияния ТПД на микроструктуру теплостойких сталей: для последующей вакуумной цементации подобраны образцы со степенями пластической деформации $\epsilon = 0\%$; 40% ; 80% ;

2) Полученные результаты исследования структуры после теплой пластической деформации и последующей вакуумной цементации показали, что:

с увеличением времени активной стадии цикла вакуумной цементации происходит рост толщины диффузионного слоя, а также увеличилась концентрация углерода на поверхности исследуемого образца;

- с увеличением времени активной стадии происходит стабилизация аустенита за счет карбидообразования;

- с увеличением времени пассивной стадии цикла происходит рост толщины диффузионного слоя, но уменьшается концентрация углерода на поверхности;

3) Подтверждена параболическая зависимость эффективной толщины слоя от общего времени насыщения.

Литература

1. Рыжов Н. М., Семенов М. Ю. Износостойкость цементованного слоя легированной стали с избыточной карбидной фазой // Трение и износ. 1998 Т. 19, № 2. С. 235 – 240.
2. Рыжов Н. М., Семенов М. Ю., Фахуртдинов Р.С. и др. Модель диффузионного роста частиц карбидной фазы в цементованном слое теплостойких сталей // Металловедение и Термическая Обработка Металлов. 1998. № 9. С. 26 - 30.
3. Семенов М. Ю. Управление строением цементованных слоев теплостойких сталей. Часть I // Металловедение и Термическая Обработка Металлов. 2013. № 5. С. 31 - 38.
4. Семенов М. Ю. Управление строением цементованных слоев теплостойких сталей. Часть II // Металловедение и Термическая Обработка Металлов. 2013. № 5. С. 32 - 37.

УДК 62-405.8

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Ненад Драганович Симич-Лафицкий⁽¹⁾, Анастасия Андреевна Александрова⁽²⁾, Ксения Олеговна Базалева⁽³⁾

Студент 6 курса⁽¹⁾, студентка 4 курса⁽²⁾, доцент⁽³⁾
кафедры «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана

Научный руководитель: К.О. Базалева

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Введение

В настоящее время большой интерес представляют аддитивные технологии изготовления машиностроительных деталей, в том числе технология лазерной перекристаллизации порошковых материалов. Эти технологии дают возможность создавать детали сложной формы за счет 3d-компактирования, а также формировать изделия с градиентом пористости, изменяя технологические параметры процесса. Помимо уникальных технологических возможностей, эти методы представляют интерес с точки зрения формирования необычных структурных состояний. Особые условия кристаллизации, а именно, высокие скорости нагрева и охлаждения (порядка 10^5 °/с), приводят к возникновению неравновесных структур, что позволяет надеяться на наличие у них особых свойств.

Данная работа направлена на изучение особенностей структуры и свойств жаропрочного никелевого сплава ЖС6-ВИ, полученного методом селективного лазерного плавления.

Материалы и методики

В данной работе перекристаллизации подвергался порошок жаропрочного никелевого сплава ЖС6-ВИ. Химический состав сплава представлен в таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав сплава ЖС6-ВИ

Ni,%	Cr,%	Co,%	Al,%	Ti,%	Mo,%	W,%	C,%	B,%
Основа	10,6	4,7	5,6	2,7	4	5,2	0,16	0,02

Одним из методов лазерной перекристаллизации порошковых материалов является селективное лазерное плавление (СЛП). На рисунке 1 представлена схема метода. Сканирование лазера воспроизводит одно из сечений будущей детали. Далее, подача порошкового материала, его распределение и обработка лазером повторяется многократно до получения готовой детали заданной формы. Следует отметить, что при определенном подборе параметров данного метода лазерной обработки каждый участок объема материала подвергается многократной переплавке, т.к. глубина зоны плавления превышает толщину одного слоя порошка, а при сканировании лазера по поверхности, зоны плавления перекрываются по ширине.

В данной работе селективное лазерное плавление осуществлялось с помощью установки Concept Laser M2 Cusing. Мощность лазера составляла 170 Вт, скорость сканирования по поверхности – 800 мм/с, диаметр сфокусированного пятна лазера – 150 мкм.

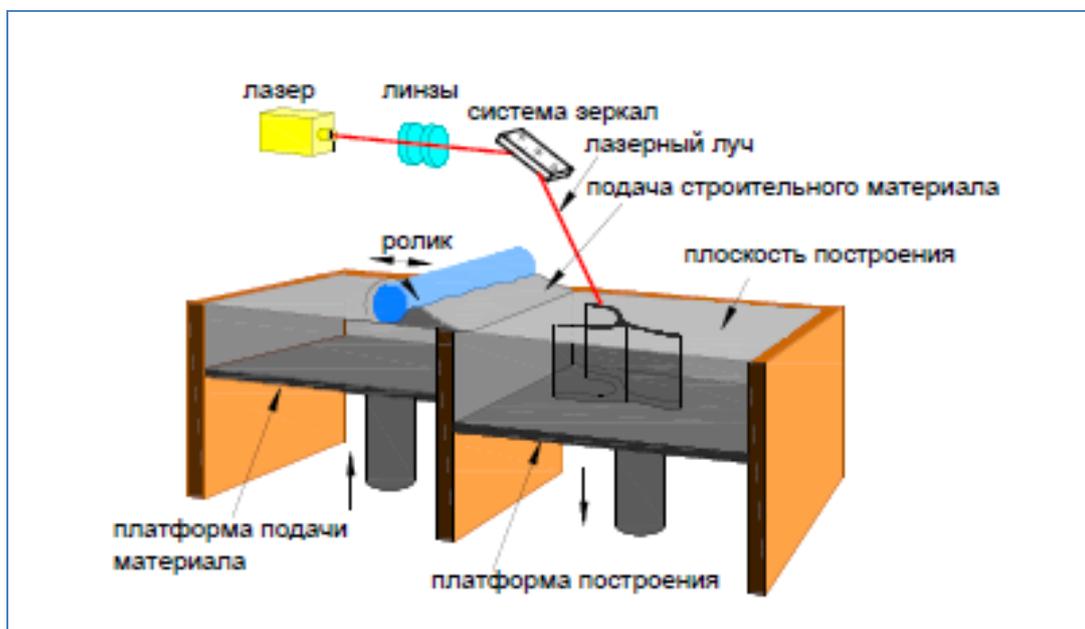


Рис. 1. Схема установки для селективного лазерного плавления

Структура никелевого сплава после СЛП исследовалась методом металлографического анализа, а также с помощью растровой электронной микроскопии. Исследования структуры проводились как в продольном, так и в поперечном сечениях. Методом рентгеноструктурного анализа определялся фазовый состав сплава и физическое уширение рентгеновских линий. Также проводились замеры микротвёрдости сплава.

Исследования проводились как в исходном состоянии, так и после обработок: термической и газостатической (ГИП) при температуре 1220 °С в течение 3 ч и охлаждении на воздухе, при ГИП давление аргона составляло 170 МПа.

На рисунке 2 а представлена схема стратегии плавления никелевого сплава при СЛП. Методом растровой электронной микроскопии показано, что направления треков на поверхности образца соответствует схеме данной плавления (см. рис. 2 б).

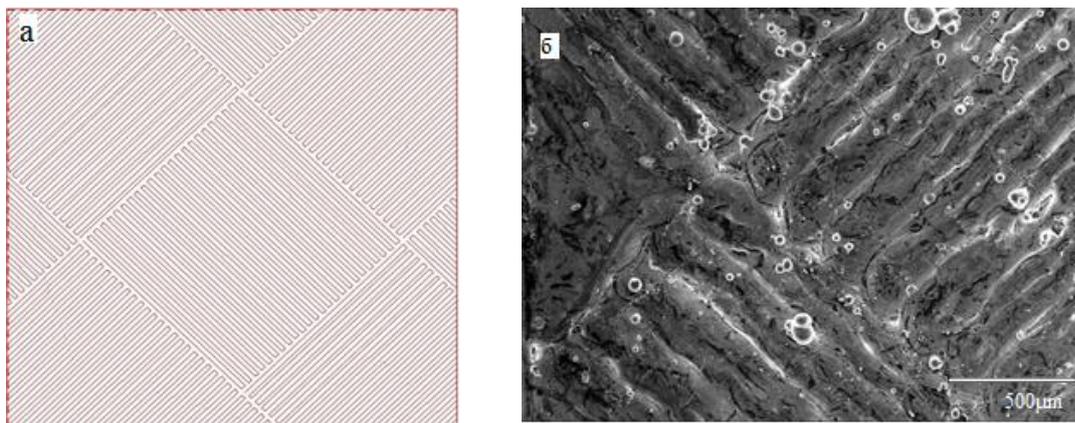


Рис. 2. Технологии стохастического экспонирования: а – схема стратегии плавления; б – треки на поверхности образца (РЭМ)

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 представлена микроструктура никелевого сплава, полученного методом СЛП. В сечении, параллельном поверхности сканирования (продольное сечение), отчетливо видны треки, соответствующие направлению движения лазерного луча. В одном слое сканирование ведется в одном направлении (юго-восток – северо-запад), в соседнем слое перпендикулярно предыдущему направлению.

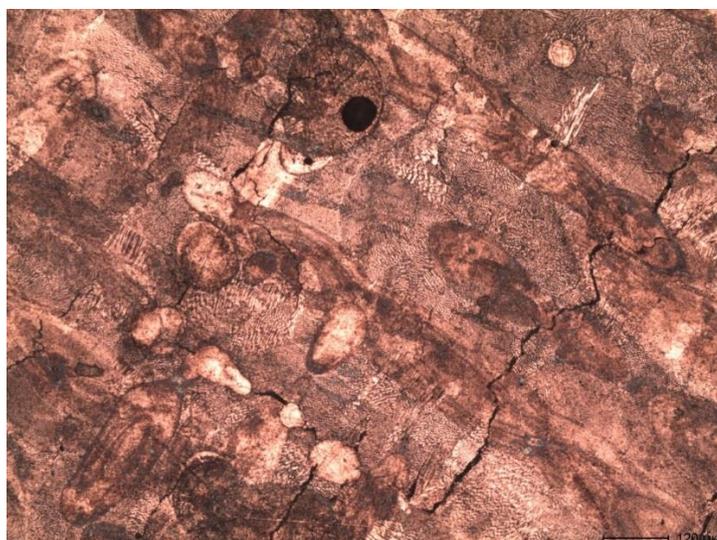


Рис. 3. Металлографическая структура в продольном сечении

В сечении, перпендикулярном плоскости сканирования (поперечное сечение) видны так называемые ванны расплава. Средняя ширина ванн расплава составляет 200-220 мкм, а глубина 60-80 мкм (рис. 4).

При большем увеличении (см. рис. 5) видно, что структура ванн расплава неоднородна: она разбита на мелкие ячейки кристаллизации диаметром около микрона. Из литературы известно, что после лазерного воздействия в металлах и сплавах формируется ячеистая структура [1, 2].

Также ячеистая структура была исследована с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

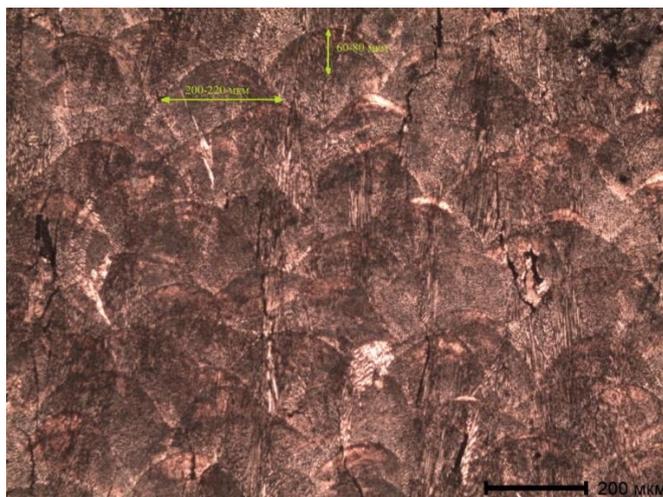


Рис. 4. Металлографическая структура в поперечном сечении

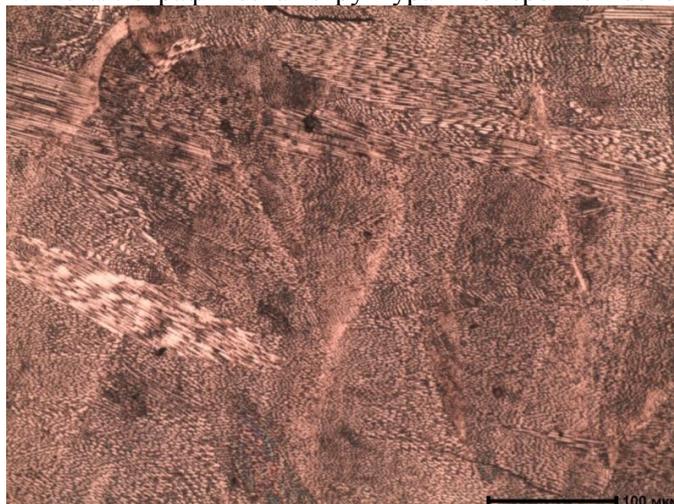


Рис. 5. Ячеистая структура

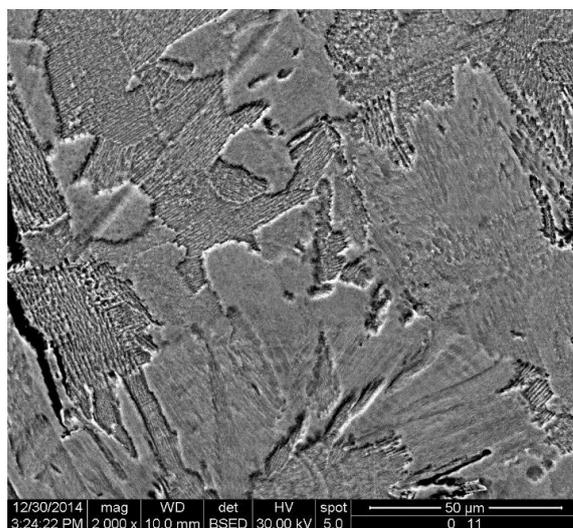


Рис. 6. Ячеистая структура, РЭМ

На рисунке 7 приведена микроструктура жаропрочного никелевого сплава, полученная после дополнительных обработок (РЭМ). Наблюдаемая структура является характерной для никелевых жаропрочных сплавов после литья и термической обработки. Здесь видно области

γ' -фазы близкой к кубической формы и прослойки γ -твердого раствора. Следует отметить, что размер γ' -областей совпадает с размером исходных ячеек кристаллизации.

Измерения микротвердости показали, что значение микротвердости сплава в исходном состоянии после СЛП находится в пределах от 420 до 480 $HV_{0.05}$, после дополнительной обработки твердость падает до нижней границы и составляет 410-420 $HV_{0.05}$.

Методом рентгеновского фазового анализа показано, что в структуре сплава, полученного методом СЛП, присутствуют γ -твердый раствор на основе никеля и изоморфная γ' -фаза (Ni_3Al), которая представляет собой упорядоченный γ -твердый раствор. Также в структуре сплава обнаружены карбидные частицы типа MeC с ГЦК кристаллической решеткой и Me_2C с ГПУ решеткой, где ($Me = Ti, Mo, W$) и фазы Ni_3Ti и Ni_4B_3 .

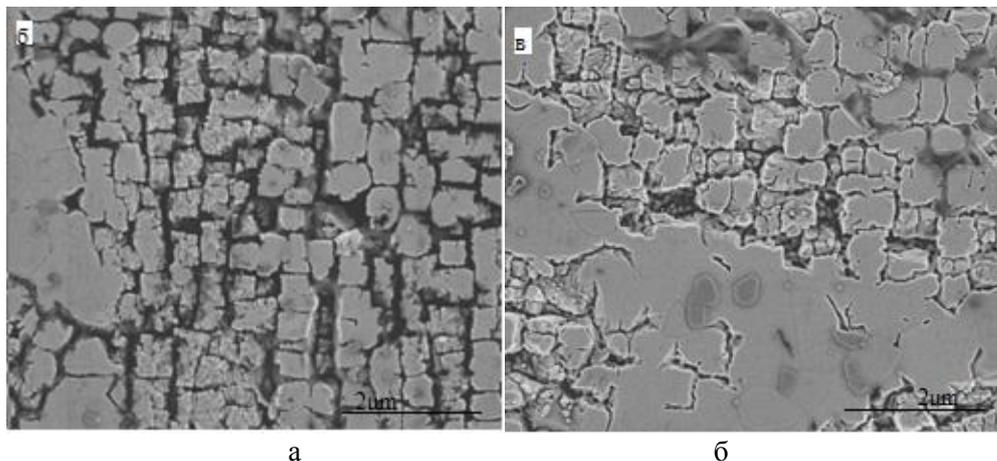


Рис. 7. Структура сплава после дополнительной обработки:
а - термической; б - газостатической

На рисунке 8 представлены рентгенограммы никелевого сплава после СЛП в продольном и поперечном сечениях.

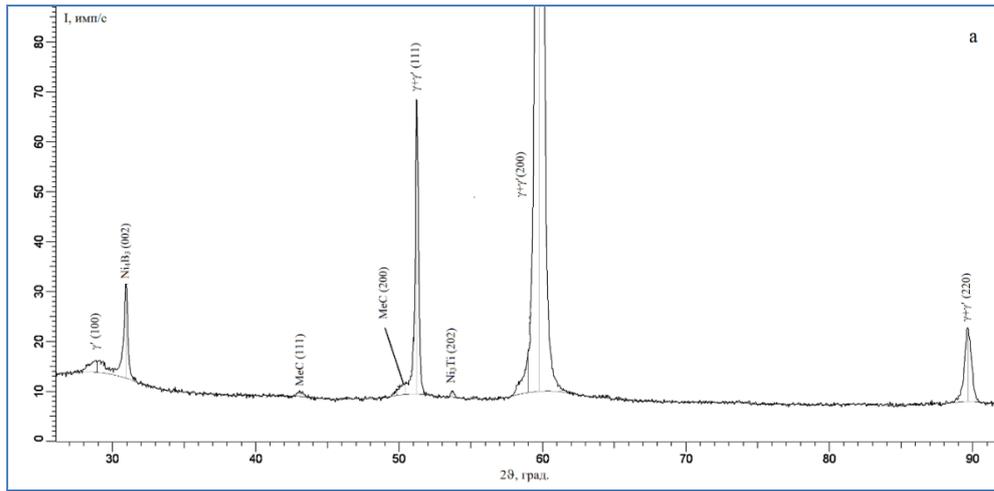
После обработки в структуре сплава обнаружены γ -твердый раствор на основе никеля, изоморфная γ' -фаза (Ni_3Al), а также карбиды типа Me_6C и MeC и фаза Ni_3Ti . После термической обработки выделяется большое количество карбидов типа Me_6C и MeC , об этом мы можем судить по появлению большего количества пиков, соответствующих этим фазам. Рентгенограмма никелевого сплава после термической обработки представлена на рисунке 9.

Выводы

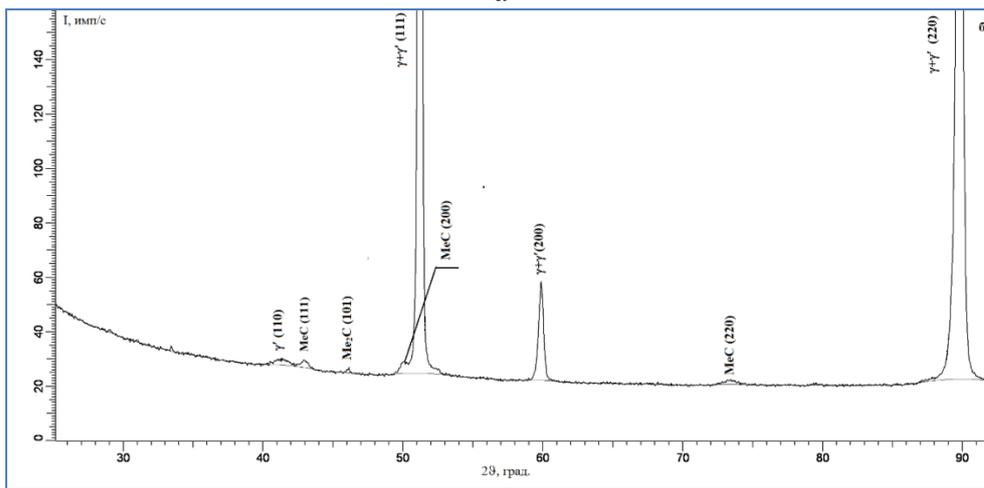
1. Методами металлографического анализа и растровой электронной микроскопии исследована структура никелевого сплава ЖС6-ВИ после СЛП. Показано, что в продольном сечении наблюдается трековая структура, в поперечном видны ванны расплава, разбитые на ячейки кристаллизации.

2. Методом рентгенодифракционного фазового анализа показано, что в сплаве после СЛП присутствуют γ -твердый раствор на основе никеля и изоморфная γ' -фаза (Ni_3Al), а также карбидные частицы типа MeC с ГЦК кристаллической решеткой и Me_2C с ГПУ решеткой, где ($Me = Ti, Mo, W$) и фазы Ni_3Ti и Ni_4B_3 . После термической обработки в сплаве обнаружены γ -твердый раствор на основе никеля, изоморфная γ' -фаза (Ni_3Al), а также карбиды типа Me_6C и MeC и фаза Ni_3Ti .

3. Показано, что твердость никелевого сплава ЖС6-ВИ уменьшается после дополнительных обработок.



а



б

Рис. 8. Рентгенограмма никелевого сплава после СЛП: а – продольное сечение, б – перпендикулярное сечение

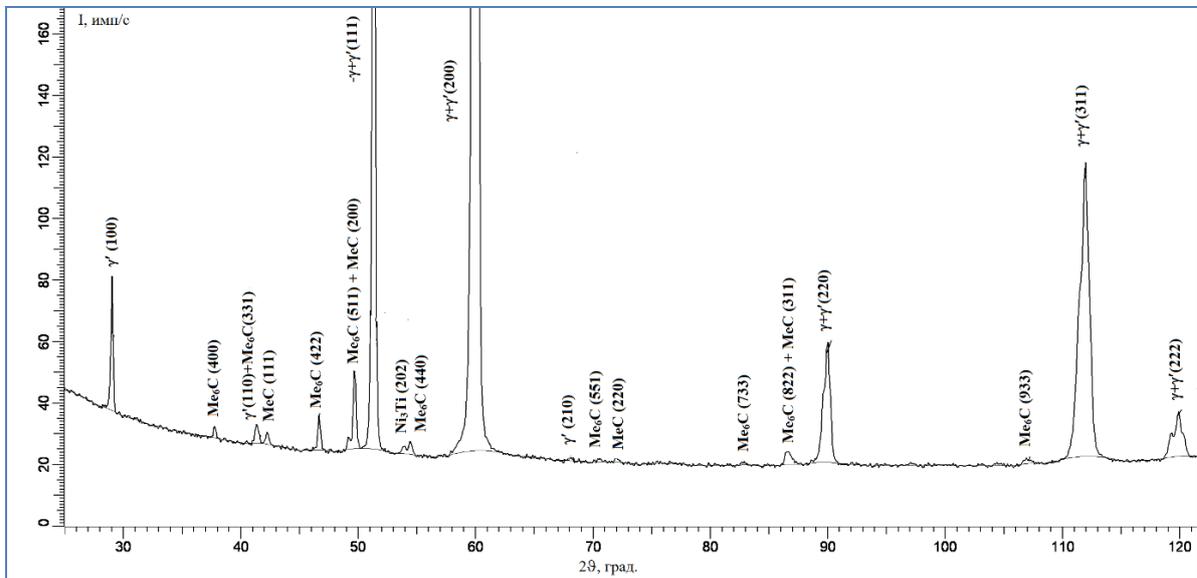


Рис. 9. Рентгенограмма сплава ЖС6-ВИ после термической обработки

Литература

1. *Lore Thijs, Frederik Verhaeghe, Tom Craeghs, Jan Van Humbeeck, Jean-Pierre Kruth.* A Study Of The Microstructural Evolution During Selective Laser Melting of Ti–6Al–4V // *Acta Materialia*, 2010.
2. *Евгенов А. Г., Рогалев А. М., Неруш С. В., Мазалов И. С.* Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // *Электронный научный журнал «ТРУДЫ ВИАМ»*, 2015.- № 2.
3. *Chunlei Qiu, Nicholas J.E. Adkins, Moataz M. Attallah.* Microstructure And Tensile Properties Of Selectively Laser-Melted And Of Hiped Laser-Melted Ti–6Al–4V // *Materials science and engineering*, 2013.

УДК 669.018.9

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЫ

Максим Сергеевич Холин

Студент 4 курса

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: Т.В. Соловьева

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Создание нового класса материалов, называемых композиционными, - одно из наиболее крупных достижений в области материаловедения за последние десятилетия. Большой интерес к этим материалам вызван высоким уровнем их конструкционных свойств, которые позволяют существенно повысить надежность и весовую эффективность, снизить материалоемкость изделий.

Особый интерес представляет композиционный материал системы Al - Al₂O₃. Композиционные материалы с металлической матрицей, упрочненные частицами, широко используются в аэрокосмической, авиационной и автомобильной промышленности из-за повышенного удельного модуля упругости, высокой удельной прочности, износостойкости, хорошей коррозионной стойкости. Кроме того они не горят, не поглощают влагу, имеют хорошую электро- и теплопроводность, стойки к действию света и радиации. Такие композиты изготавливаются различными способами, большинство из которых требует значительных денежных затрат.

Многие из существующих методов изготовления композиционного материала относятся к порошковой металлургии, следовательно, связаны со всеми присущими ей трудностями. Некоторые из них: сравнительно высокая стоимость металлических порошков; необходимость спекания в защитной атмосфере (что увеличивает себестоимость изделий); трудность изготовления в некоторых случаях изделий и заготовок больших размеров; сложность получения металлов и сплавов в компактном беспористом состоянии; необходимость применения чистых исходных порошков. Ясно, что получение композитов порошковой металлургией относится к дорогостоящим методам. Вследствие этого в настоящий момент актуальна разработка новых экономичных способов производства композиционных материалов с металлической матрицей, упрочненных частицами.

Использование пластической деформации может создать условия, необходимые для схватывания металла и получения сплошного прочного соединения. Поэтому параметры

процесса пластической деформации оказывают решающее влияние на качество получаемого соединения.

Особенностью деформации многослойных композиций является различие свойств их составляющих, приводящее к неравномерному распределению деформации между слоями. Это вызывается тем, что в большей степени деформируется металл, обладающий меньшим сопротивлением деформации. Кроме того, деформация многослойного тела в отличие от деформации монолитного тела происходит в условиях межслойного трения. Это относится к тому периоду процесса, когда еще не произошло прочного соединения слоев композиции.

Для получения композиционного слоистого материала системы Al - Al₂O₃ с повышенной удельной прочностью были использованы смеси порошков Al и Al₂O₃ в необходимых пропорциях, а именно:

1. 99 % Al + 1 % Al₂O₃
2. 97 % Al + 3 % Al₂O₃
3. 95 % Al + 5 % Al₂O₃
4. 90 % Al + 10 % Al₂O₃
5. 85 % Al + 15 % Al₂O₃
6. 75 % Al + 25 % Al₂O₃
7. 50 % Al + 50 % Al₂O₃

Физические свойства порошков Al и Al₂O₃ представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1. Физические свойства порошка Al

Внешний вид	Порошок серого цвета, сильно агломерирован
Средний размер частиц, нм	25-40
Насыпная плотность, г/см ³	0,30-0,37
Удельная поверхность, м ² /г	18-20
Температура плавления, °С	640

Таблица 2. Физические свойства порошка Al₂O₃

Внешний вид	Чешуйки серого цвета, собранные агломераты
Средний размер частиц, нм	20-30
Насыпная плотность, г/см ³	0,70
Удельная поверхность, м ² /г	20-25
Температура плавления, °С	2044

Использовали также фольгу А5 (ГОСТ 618-73), химический состав которой представлен в таблице 3, механические свойства – в таблице 4.

Таблица 3. Химический состав фольги марки А5

Химический состав, %							
Al, не менее, %	Примеси, не более, %						
	Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Прочие примеси	Сумма
99,5	0,30	0,25	0,02	0,06	0,02	0,03	0,50

Таблица 4. Механические свойства алюминиевой фольги А5

Марка фольги	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , % не менее
А5	40	3

Известно, что чем тоньше алюминиевая фольга в композите Al - Al₂O₃, тем выше его прочностные характеристики. Исходя из этого, предлагается следующая технологическая схема

изготовления слоистого композита: сделать набор пластин из алюминиевой фольги и совместно прокатать их, доведя толщину слоя до микро- и наноразмеров. При этом на каждую пластину предварительно нанести слой оксида алюминия.

Из фольги А5 вырезали пластины размером 0,08x50x150 мм. Перед нанесением смеси из порошков Al и Al₂O₃, обе стороны каждой алюминиевой пластины подвергали обезжириванию ацетоном.

Оксид алюминия по сути своей является неметаллическим включением и поэтому, естественно, с алюминием не образует металлической связи (адгезии). Если на Al фольгу нанести только порошок Al₂O₃, то потребуются большая температура и степень деформации пакета, чтобы образовались разломы в слое керамики, через которые бы мог «экструдировать» алюминий для образования соединения между пластинами. Вследствие непрочного соединения слоев Al, существует большая вероятность расслоения композита в процессе прокатки. В связи с этим большой научный интерес представляет вопрос того, каким по толщине должен быть слой из оксида алюминия, чтобы при деформации пластичный алюминий проник в слой Al₂O₃, а жесткие частицы оксида алюминия внедрились в алюминиевую основу, и, тем самым, обеспечили бы достаточную прочность соединения слоев между собой. Поэтому изучение переходной зоны между слоями имеет большое значение.

В ходе данной работы было предложено искусственно создать переходную зону из смеси порошков Al и Al₂O₃, размеры частиц которых составили 25- 40 нм и 20-30 нм соответственно. Благодаря этому при прокатке под действием давления смесь из порошков уплотняется и при достаточных степенях деформации нанопорошок Al обволакивает частицы керамики Al₂O₃ и образует металлическую связь с алюминиевыми пластинами из фольги. При этом происходит диффузия частиц Al₂O₃ вглубь фольги и их распределение в объеме металла.

Смесь из нанопорошков Al и Al₂O₃ готовилась в разных пропорциях: 99% Al + 1% Al₂O₃; 97% Al + 3% Al₂O₃; 95% Al + 5% Al₂O₃; 90% Al + 10% Al₂O₃; 85% Al + 15% Al₂O₃; 75% Al + 25% Al₂O₃; 50% Al + 50% Al₂O₃.

Исследовали несколько различных способов нанесения смеси из порошков Al и Al₂O₃ на поверхности пластин: засыпка на алюминиевые полосы, приготовлении суспензии из порошков и ее распыление, нанесения суспензии кистью. Лучшие результаты были зафиксированы при нанесении суспензии из порошков с использованием кисти. При других способах наблюдалось наличие непокрытых участков поверхностей пластин, более неравномерное распределение порошка.

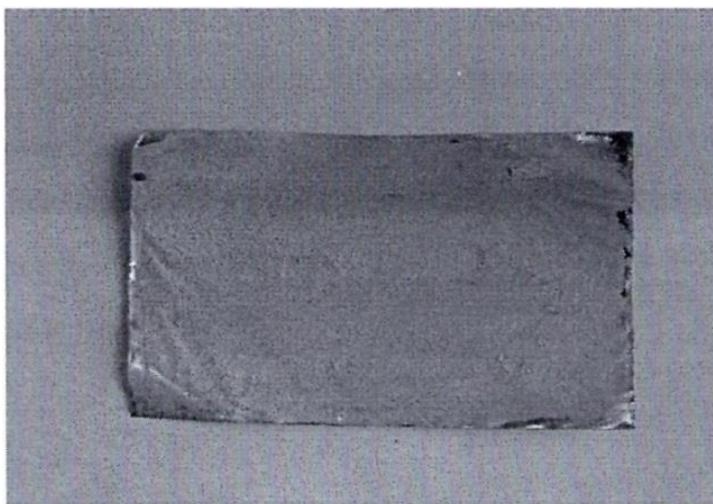


Рис. 1. Поверхность алюминиевой фольги с нанесенной суспензией из смеси порошков Al и Al₂O₃

Для приготовления суспензии в полученную смесь порошков вводилась связующая жидкость. В качестве связующих жидкостей были исследованы поливиниловый спирт, вода,

денатурат спирта. Наиболее приемлемым оказался поливиниловый спирт в соотношении 100 мл воды на 3 г порошка. Полученная суспензия наносилась на одну из сторон каждой алюминиевой пластины (рисунок 1).

Затем пластины из алюминиевой фольги с нанесенным слоем из смеси порошков Al и Al₂O₃, собирали в пакеты по 30-120 слоев. Помимо этого был приготовлен образец из 60 слоев алюминиевой фольги без нанесения на поверхность пластин порошка.

Толщину искусственно нанесенного слоя из порошков Al и Al₂O₃ оценивали по привесу. Для этого пакеты из 30-120 слоев фольги обезжиривали ацетоном и обезвоживали спиртом, взвешивали на аналитических весах с точностью до 5-го знака. После нанесения кистью суспензии на поверхность фольги и ее просушки, а так же после сборки пластин в пакеты их вновь взвесили на аналитических весах. По изменению массы пакета оценивали толщину покрытия при допущении равномерного распределения суспензии по поверхности фольги. По полученным данным толщина нанесенного слоя из смеси порошков Al и Al₂O₃ составила от 5 до 16 мкм.

Подготовленные пакеты скрепляли с двух концов алюминиевыми заклепками, во избежание смещения пластин друг относительно друга при прокатке. Затем пакеты предварительно осаждали на гидравлическом прессе при следующих параметрах процесса:

- предварительный нагрев пакетов в течение 40 мин при температуре 400°C;
- нагрузка 70 т;
- время выдержки под давлением 2-3 мин.

После прессования пакеты прокатывали на стане «ДУО-300» и «Кватро» с различными степенями обжатия за проход. Перед прокаткой образцы из слоистого композиционного материала Al - Al₂O₃ нагревали в камерной печи для обеспечения большей диффузии, повышения пластичности Al, что в свою очередь приведет к увеличению прочности связи между слоями металла и распределению частиц керамики. Кроме того, поскольку во время захвата пакета валками происходит смещение полос в направлении прокатки, первичную деформацию проводили в стальных обкладках.

В работе был исследован температурный интервал 350-450 °С, степень обжатия в диапазоне 5-20 % за проход. По критерию прочности соединения без расслоений слоев явились следующие параметры процесса прокатки: температура 400 °С, степень обжатия за проход 8-15 % на стане «ДУО-300», 10-20 % - на стане «Кватро». После прокатки образцов на стане «ДУО-300» снимались обкладки. В результате были получены образцы толщиной 0,3 мм.

После прокатки и вырезки необходимых образцов проводили рекристаллизационный отжиг в течение одного часа при температуре 300 °С.

Испытания на растяжение для композитов с различным содержанием частиц керамики в исходной смеси, проведенные на машине «Инстрон» с компьютерной обработкой результатов, показали следующее:

- с увеличением содержания Al₂O₃ от 1 до 10 % в исходной смеси порошков наблюдается повышение прочностных характеристик;
- при дальнейшем увеличении содержания Al₂O₃ от 10 до 25 % было зафиксировано уменьшение предела прочности и текучести.

Средние значения механических свойств слоистого композиционного материала Al - Al₂O₃ представлены в табл. 5.

Таблица 5. Механические свойства композита Al - Al₂O₃.

№ образца	Предел текучести σ _T , МПа	Предел прочности σ _B , МПа	Относительное удлинение δ, %
1 (25 % Al ₂ O ₃)	86	94	4,48
2 (25 % Al ₂ O ₃)	91	99	3,53
3 (15 % Al ₂ O ₃)	110	112	1,09

4 (10 % Al ₂ O ₃)	114	124	3,14
5 (5 % Al ₂ O ₃)	86,5	92,5	2,1
6 (3 % Al ₂ O ₃)	85	88,5	2,16
7 (1 % Al ₂ O ₃)	82,5	87	1,33
8 (0 % Al ₂ O ₃)	82	85,5	1,71

Схематически технология производства слоистого композиционного материала системы Al - Al₂O₃ представлена на рисунке 2.

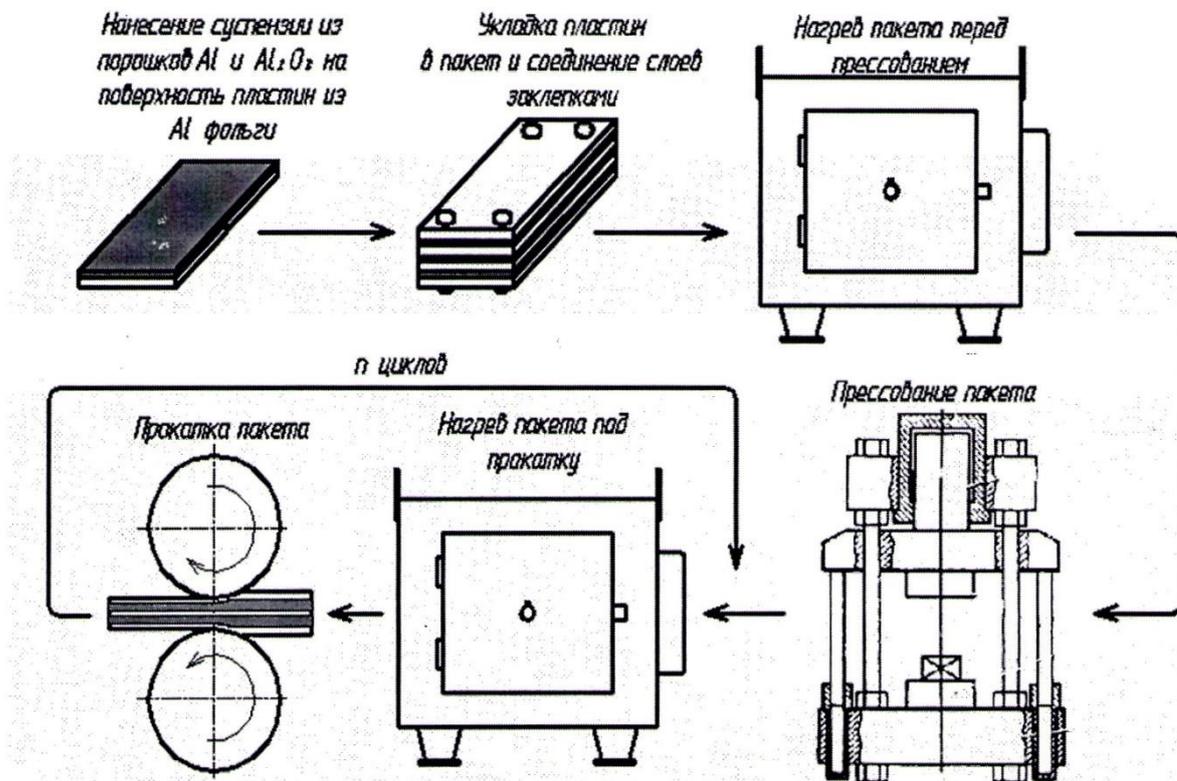


Рис. 2. Технология производства слоистого композиционного материала системы Al - Al₂O₃

Выводы

1. Под действием достаточного давления и температуры порошок чистого алюминия обволакивает частицы Al₂O₃ и образует металлическую связь с Al фольгой.
2. При повышении степени деформации уменьшается количество видимых расслоений, пористость, композит уплотняется, частицы порошка более равномерно распределяются по объему.
3. Увеличение температуры приводит к уменьшению сопротивления пластического течения металла; увеличению скорости диффузии; уменьшению значения степени деформации, необходимой для начала образования связей между слоями алюминия. В конечном итоге повышается прочность композиционного материала.
4. При увеличении содержания Al₂O₃ от 10 до 25 % было зафиксировано уменьшение предела прочности и текучести, что объясняется отсутствием прочной связи между алюминиевыми пластинами, наличием пористости из-за недостаточной степени деформации при таком содержании керамики, что подтверждается снимками микроструктуры образцов. Наличие порошка керамики уменьшает коэффициент трения на границе раздела, так как он выступает в роли смазочного материала, следовательно, нужна большая степень деформации. Также можно повысить температуру прокатки до 450 °С для увеличения диффузии.

Литература

1. *Б.Н. Арзамасов, В.И Макарова, Г.Г. Мухин, В.И. Силаева.* Материаловедение. Учебник для технических вузов. 5-е издание. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003 — 646 с.
2. *И.Н. Фридляндер.* Алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1978 — 192 с.
3. *Дриц М.Е.* Структура и свойства легированной алюминиевой фольги / *М.Е. Дриц, Э.С. Каданер, Л.С. Торопова.* - М.: Металлургия, 1975 - 184 с.
4. *Трыков, Ю.П.* Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов / *Ю.П. Трыков, Л.М. Гуревич, В.Г. Шморгунов.* - М.: Metallurgizdat, 2004. - 230с.
5. *Мэттьюз Ф.* Композитные материалы. Механика и технология / *Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс.* - М.: Техносфера, 2004. - 408 с.

Секция IX

Промышленный дизайн

Председатель:

Терехова Наталья Юрьевна

кандидат технических наук, доцент, член Союза
дизайнеров России, заместитель заведующего кафедры
«Промышленный дизайн» (МТ-9)

Ученый секретарь:

Сафин Дмитрий Юсупович

ст. преподаватель кафедры МТ-9

УДК 53.084.823

ПОРТАТИВНОЕ ЗАЩИЩЕННОЕ НАВИГАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВОЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Ольга Андреевна Швецова

Студентка 6 курса

кафедра «Промышленный дизайн»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Е. Алымова

старший преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»

Дипломная работа «Портативное защищенное навигационное устройство специального назначения» была посвящена дизайнерской разработке концептуального проекта GPS/ГЛОНАСС навигатора (рабочее название - ОРИОН) для военнослужащих РФ. Инициатором данной работы стала компания КБ «НАВИС» - российский разработчик навигационного оборудования. Компания готовила запуск навигационного прибора ОРИОН нового поколения и ей необходима была работа по созданию внешнего образа (и частично, предложения по улучшению функционала) устройства. Напомню, что навигатор – это портативное устройство, принимающее сигналы от спутников группировки GPS и ГЛОНАСС и вычисляющее точное местоположение пользователя.

В данной статье я опишу процесс, предшествующий разработке и являющийся ее неотъемлемой частью – это исследования. Исследования очень важны, так как без глубокого погружения во все детали конструкции объекта и аспекты использования, хранения, ношения, транспортировки и т.п. невозможно выдвинуть новаторскую идею, а значит и невозможно создать оригинальный продукт.

Свою исследовательскую работу я начала с изучения опыта заказчика (КБ «Навис»). Компания уже имела на тот момент в своей линейке продуктов аналогичный военный навигатор и у нее был накоплен опыт по использованию его в полевых условиях.

Выяснилось, что основными проблемами при работе с прибором ОРИОН прошлого поколения были:

1. **Невозможность работы с прибором в перчатках.** Кнопки у прошлого ОРИОНА маленькие, кучно расположенные в нижней части фронтальной панели. При нажатии кнопок пользователи часто ошибались, а сам прибор норовил перевернуться и выскользнуть из рук.
2. **Прибор было сложно удерживать в руке.** Фрикционные вставки были спроектированы не удачно и не выполняли своей функции.
3. **Плохая эргономика корпуса.**
4. **Невыразительный внешний вид.**

Кроме того, стало понятно что основными проблемами навигационной портативной техники для военных являются: **длительность автономной работы от аккумуляторных батарей** (очень бы хотелось ее увеличить не только за счет увеличения емкости, а значит веса и габаритов батареи), **качество приема сигнала и вес устройства** (солдаты несут немалый вес экипировки и увеличение веса – это однозначное снижение боеспособности).

Параллельно, я проводила кабинетные исследования прямых и косвенных аналогов ОРИОНа. Прямые аналоги – это армейские портативные навигаторы российского и зарубежного производства. По российским навигаторам удалось найти интересную пользовательскую информацию в блогах и в отчетах со специализированных выставках. Информация для анализа зарубежных навигаторов (в исследование вошли только американские

армейские навигаторы) получена на сайте производителя, из роликов YouTube, из блогов любителей этой специфической техники.

Косвенные аналоги – это гражданские навигаторы. Они очень схожи по задачам с исследуемым прибором. Основное отличие гражданских приборов от военных – прием только открытого, менее точного (по сравнению с закрытым, военным) сигнала. Помимо этого, гражданские устройства не так надежны в использовании. Еще были исследованы множество различных защищенных устройств: от раций и радиостанции до ударопрочных наручных часов. Анализировались конструкции всех этих устройств на предмет защиты от ударов, влаги и пыли. Анализировались отзывы пользователей подобных устройств (это обычно охотники, рыболовы, туристы, спортсмены) – в каких случаях они ломали, теряли свою портативную электронику, что их не устраивает в ней.

Помимо кабинетных исследований, я посещала специализированные выставки, разговаривала с бывшими военными, воевавшими в горячих точках и имеющими опыт работы с навигационной портативной аппаратурой, общалась с туристами-любителями, имеющими подобные приборы.

Из всей полученной информации я сделала такие выводы:

1. Очень важна длительность автономной работы устройства.
2. Предпочтительны камуфляжные цвета корпуса.
3. Экран должен быть защищен потивоударным бампером.
4. Блок кнопок управления следует разделить на главные и второстепенные. Главные кнопки следует спроектировать действительно большими и удобными для нажатия в перчатках.

5. Очень нужна страховка от потери. Это может быть просто ушко в корпусе, в котором можно закрепить страховочную веревку/тросик с карабином.

Сосредоточившись на проблеме снижения расхода энергии батарей, я выяснила, что самые энергозатратные компоненты навигатора – это яркий цветной LED экран и процессор.

Каждый раз, когда пользователь включает экран, даже на секунду, чтобы просто свериться с маршрутом или с показанием высотомера, батарея существенно садится. Надо сказать, что в полевых условиях мало кто из пользователей изучает карту, ради которой производителем и сделан такой большой и контрастный экран – карту обычно изучают при подготовке к походу или спец. операции. В полевых же условиях, а особенно в условиях военных действий, на первый план выходит оперативность взаимодействия пользователя и прибора. В идеальном случае – прибор должен **всегда** показывать основную навигационную информацию: «где я?» (координаты местности – достаточная информация), «куда мне идти?» (показания электронного компаса или стрелки, указывающей направление к заранее заданной конечной точке маршрута), «как я?» (путевая статистика – пройденный путь, средняя скорость, текущая высота над уровнем моря и т.п.).

Таким образом получается, что при том, что на большой цветной экран тратится существенная часть энергии батарей, его параметры (цветность, размер, яркость) избыточны для большинства типовых описанных выше задач. Для усугубления этого несоответствия отмечу, что карта как таковая во многих случаях не нужна и потому, что она не информативна: это любая местность, бедная ориентирами (большой лес вдали от городов, тундра, тайга, пустыня, степь и т.п.), это сельская местность, где картография не успевает за изменениями (снос/постройка домов) и т.п.

При этом следует отметить, что нельзя отказаться от большого цветного экрана – задача поставлена спроектировать универсальное устройство, способное ориентировать пользователя и в пустыне и в густонаселенном городе, в котором без карты очень сложно найти нужный объект.

Объединив все полученные в исследовании данные, я пришла к выводу что нужно спроектировать **устройство с двумя экранами**, один из которых большой, цветной, служит для

отображения карт местности; другой маленький ч/б экран, для основного использования – отображает навигационные данные в цифровом и простом графическом виде. Эта идея, в сочетании с моим предложением сделать энергонезависимыми эти два экрана, а также процессор, получила поддержку представителей КБ «НАВИС» - по предварительным оценкам, это может **в двое увеличить время автономной работы прибора**, что особенно очень важно в условиях военных действий, где наличие точной навигационной информации может помочь спасти жизни людей.

УДК 67.05

МЕХАНИЗМЫ ФРАНЦА РЁЛО

Дарья Дмитриевна Спасская

Студентка 6 курса, специалитет

кафедра «Системы обработки информации и управления»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

spasskaydd@mail.ru

Максим Эдуардович Власов

Студент 3 курса, бакалавриат

кафедра «Биомедицинские технические системы»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

maximvlasov@inbox.ru

Наталья Сергеевна Кунова

Студентка 5 курса, специалитет

кафедра «Системы обработки информации и управления»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Kunova1992@mail.ru

Научный руководитель: И.А. Филатов

Ассистент преподавателя кафедры «Промышленный дизайн»

В современной технике механизмы машин в значительной степени являются скрытыми элементами. Тем не менее, они остаются важными компонентами во многих технических устройствах, в том числе летательных аппаратах, наземном транспорте, бытовой технике, но основным в конструкции таких устройств является кинематика.

«Отцом» современной кинематики по праву считают Франца Рёло (Рис 1.). Его вклад в развитие кинематики получил широкое признание в научном сообществе. Машиностроение еще с детства привлекало Ф. Рёло. Отец и дедушка Ф.Рёло были конструкторами машин в Бельгии. После окончания школы Ф.Рёло получил техническое образование в Политехническом Университете Karlsruhe, где он учился с главным теоретиком машинных механизмов, профессором Фердинандом Редтенбакэром (1809-1869).

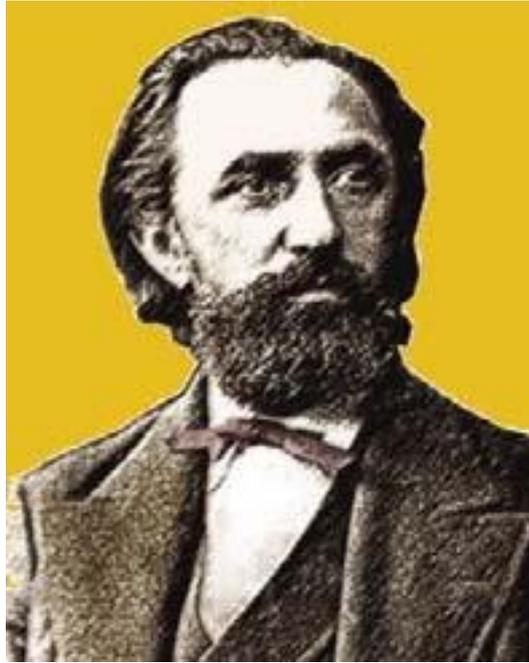


Рис. 1. Франц Рёло

В 1856 году Ф.Рёло получил приглашение стать профессором машиностроения в швейцарском институте в Цюрихе. В 1864 году в Берлине Ф.Рёло, работая в качестве директора королевского промышленного института, предложил новую программу машиностроения. Благодаря такому нововведению, в 1879 году королевский промышленный институт получает статус технического и становится одним из главных технических университетов в мире с численностью, более чем с 3 000 студентами и 300 профессорами. В это время Ф.Рёло занимает пост ректора и вводит новые образовательные программы по машиностроению в Германии, а также получает звание королевского тайного консультанта в правительстве. Ф.Рёло удалось представить элементы машины как кинематическую цепь или сеть пар связанных частей, где движение каждой части ограничено соседними частями в цепи (кинематические пары). Ф.Рёло полагал, что каждый механизм имеет свое уникальное символическое представление. Многие механизмы Ф.Рёло собрал в коллекцию. (Рис.2). Механизмы его коллекции представляют фундаментальные компоненты сложных машин и были задуманы как элементы основного «языка изобретения».



Рис. 2. Фото. Механизмы из коллекции Ф.Рёло

Некоторые модели механизмов коллекции Ф.Рёло основывались на прямом движении линии перемещения парового машинного поршня. Еще со времен Возрождения был сделан вывод, что в движении двойного ползуна могли проследить образ эллипса. Было также известно, что единственный кривошипно-ползунный механизм мог также двигаться по траектории, похожей на эллипс была продемонстрирована Ф.Рёло в модели S2 с перпендикулярно пересеченными направляющими. В модели S4 двойной механизм ползуна косвенно ориентировал ползуна направляющих и позволял произвести прямолинейное движение. В модели S3 (Рис. 3), Ф.Рёло показывает, что можно также произвести

прямолинейное движение с единственным ползуном, наклонным к линейному движению при условии, что обводной рычаг зафиксирован под специальным углом к другому рычагу.

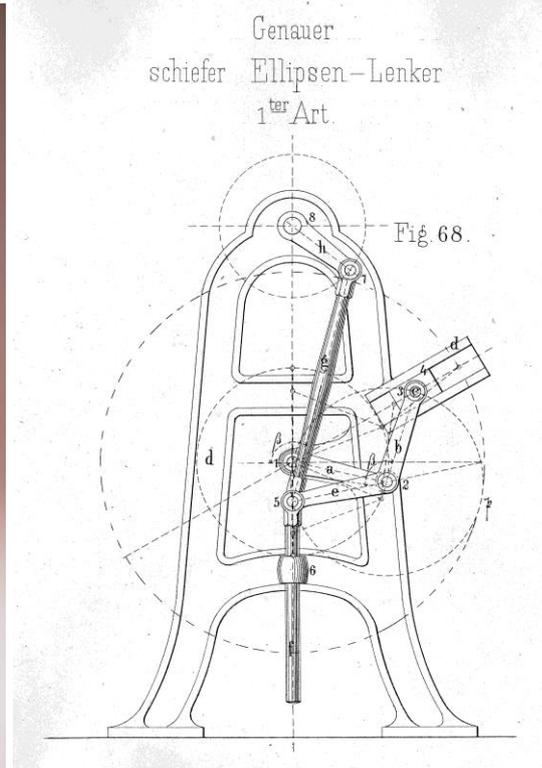


Рис. 3. Прямолинейный механизм. Модель S3

Модель S8 основывается (Рис. 4) на двойном механизме ползуна, в котором две призматические направляющие расположены не под прямым углом. Этот механизм состоит из четырех существенных звеньев: двух ползунов, одного звена сцепного прибора, которое прослеживает кривую, и постоянное звено, включающее две направляющие.

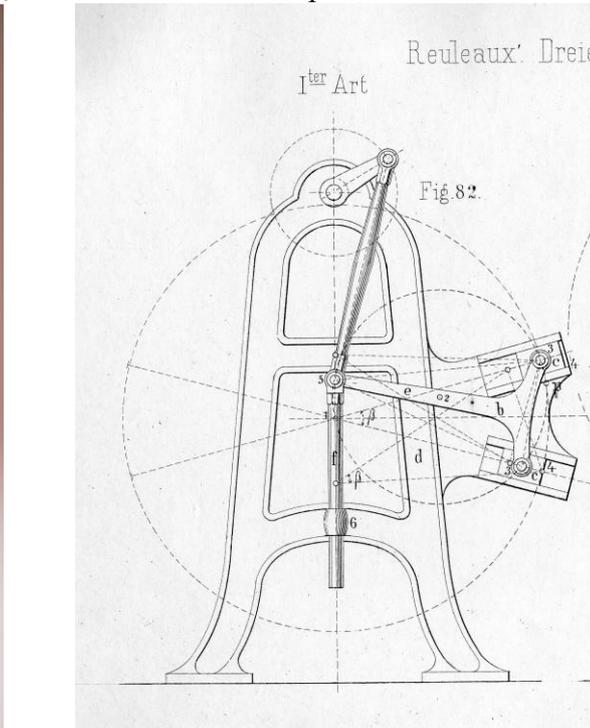


Рис. 4. Прямолинейный механизм. Модель S8

Ф.Рёло также спроектировал модели, которые в дальнейшем были представлены в коллекции университета Cornell (Рис.5.) как учебные пособия для кинематического проекта и изобретения машин.



Рис. 5. Модель R2. Математические кривые, произведенные скользящими конусами



Рис. 6. Модель S35- Прямолинейный механизм



Рис. 7. Модель N15- Скачковой механизм



Рис. 8. Модель C2- Кривошипно-ползунный механизм



Рис. 9. Модель F2- Кривошипный насос

Медные и железные модели в коллекции Ф.Рёло иллюстрируют движения насосов, двигателей, хронометрацию ременных приводов, тисков и многих других основных элементов машины. Коллекция также содержит модель двигателя V8 Chevrolet 1960 г., а так же содержит механизм автомобильных передач, который иллюстрирует некоторые из практических применений основных механизмов Ф.Рёло. Многие из моделей демонстрируют математические теоремы и геометрические кривые, связанные с механизмами и машинами, типа кривых циклоида скользящих тел, эпициклоидное движения механизмов, так называемые треугольником Рёло.

Существует так называемое «цифровое движение» модели, которая преобразовывает непрерывное движение в дискретные события подсчета, типа Женевского механизма (используется в часах) и различных считающих время механизмах. Коллекция содержит множество «забавных» механизмов, включающие эллиптические и квадратные механизмы, так же гипоидное и коническое зубчатые колеса.

Модели коллекции Ф.Рёло прямолинейных механизмов используются в обучении машиностроению, робототехнике, высшей математике. Некоторые копии моделей механизмов коллекции Ф.Рёло находятся в МГТУ им. Н.Э.Баумана. (Рис.10.).



Рис. 10. Фото. Механизм из коллекции кафедры «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Университет имеет в своей коллекции более 19 моделей таких механизмов, которые в настоящий момент нуждаются в реставрации с обязательным условием сохранения их исторической ценности и работоспособного состояния. Некоторые модели из коллекции Ф.Рёло в МГТУ им. Н.Э. Баумана используются студентами в лабораторных исследованиях по дисциплине «Теория механизмов и машин». Студенты имеют возможность “вырастить” копию механизма на 3D-принтере. Для наглядности работы механизма смоделированная копия может быть разборной и использоваться на лабораторных работах, не прибегая к использованию оригинала.

Концепция реставрации моделей механизмов основывается на ряде международных конвенций, предписывающих при проведении реставрационных работ следующие основополагающие принципы: подлинность материала, подлинность замысла, подлинность мастерства, подлинность окружения. Современная научная реставрация - достаточно трудоёмкий и ответственный процесс, который зависит от многих факторов, правил, регламентов и законов. Перед началом реставрационных работ над объектом необходимо провести ряд исследований, которые включают в себя целый список работ по техническому и конструкционному изучению механизма, провести цикл инженерно-технических изысканий. Важным моментом является согласование всех видов работ, запланированных в ходе восстановления объекта. Каждый момент реставрации фотографируют для того, чтобы отследить изменения и качество реставрации. Необходимо максимально осветить историю механизмов машин, выявить сохранившиеся остатки утраченных или поврежденных составных частей и форм механизмов и определить возможность их документально точного возобновления.

Литература.

1. Брекалов В.Г., Терехова Н.Ю., Сафин Д.Ю.- Применение технологии трёхмерного прототипирования в образовательном процессе, журнал “Дизайн и технологии”, №29(71), Москва, 2012 г.,- стр. 118-123;

2. *Егорова О.В., Тарабарин В.Б., Тимофеев Г.А.* - К истории формирования российской научной школы Прикладной механики, Известие высших учебных заведений. Машиностроение, No 2, М., сс. 76-83, 2013
3. *Федоров И.Б., Павлихин Г.П.* - Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. 175 лет, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2005
4. *Seccarelli M.* - Evolution of TMM (Theory of Machines and Mechanisms) to MMS (Machine and Mechanism Science): An Illustration Survey. In: Proc. of 11th IFToMM World Congress, Tianjin (PR China), vol. 1, pp. 13-24, 2004
5. *Francis C. Moon, Joseph Ford* - Professor of Mechanical Engineering, Fellow ASME, and Curator of the Cornell Reuleaux Collection of Kinematic Mechanisms,
6. *Golovin, A., Tarabarin V.* - Russian Models from the Mechanisms Collection of Bauman University. Series "History of Mechanism and Machine Science", vol. 5, Springer, 2008, 261p.
7. *Taimina Daina* - How to Draw a Straight Line. Kinematic Models for Design. Digital Library. Cornell University College of Engineering (kmoddl.library.cornell.edu).
8. *Uicker, J.J., Pennock, G.R., and Shigley, J.E.* - Theory of Machines and Mechanisms, Fourth Edition, Oxford University Press, 2011

УДК 53.084.823

ДИЗАЙН-ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Анна Евгеньевна Ушакова

Студент 5 курса

Кафедра « Промышленный дизайн»

Московский государственный технический университет Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Н.Ю. Терехова

Доцент кафедры « Промышленный дизайн»

Без освещения, которое создает визуальный комфорт и красоту сейчас трудно представить современную жизнь. Свет есть повсюду: на улице, в домах и офисах, в бассейне, на крыле самолета, в подсветке городских памятников, в наружном освещении фасадов зданий и прилегающих к ним территориях. К основным видам освещения относится уличное освещение, архитектурное освещение, ландшафтное освещение, декоративное освещение, охранное освещение. К современному освещению предъявляется большой спектр требований, таких как безопасность, долговечность, надежность, удобство в эксплуатации.

Без ламп светильники не смогут обеспечить освещение интерьера. Поэтому рассмотрим, различные лампы в осветительных приборах.

Целью настоящего дизайн-исследования является сравнение лампы накаливания и светодиодной лампы. Основными этапами исследования являются: анализ аналогов, выбор и проработка лучшего варианта, а также поиск новой концепции светодиодных светильников.

Светильник – это оборудование, перераспределяющее свет лампы (ламп) внутри самого светильника и обеспечивающий насыщение светового потока. Светильник рассеивает и направляет свет освещения территорий, а также выполняет декоративную функцию, в ряде случаев, светильники выполняют функцию сигнализации. Светильники подразделяются на растровые потолочные светильники, светильники направленного света, оптоволоконные светильники, встроенные потолочные светильники.

Растровые потолочные светильники – это светильники на трубчатых люминесцентных лампах, установленных, как правило, в прямоугольном корпусе. Рассеивание света достигается

вставленным в корпус решетчатым растром. Такие светильники можно увидеть на новых станциях метро, в компьютерных залах, в офисах, спортивных залах, промышленных помещениях. Они дают спокойное, сохраняющее работоспособность освещение. Революцию в накладных и встроенных потолочных светильниках совершила новая концепция освещения, которая получила название «мягкий свет». На рис. 1. показан светильник, который отвечает требованиям этой концепции. Источником света в нем служит трубчатая люминесцентная лампа. Ее светорассеивающий экран изготовлен из перфорированного стального листа, окрашенного белой термоотверждающейся краской, внутри располагается световой диффузор.



Рис.1. Растровый потолочный светильник.

Светильники направленного света дают возможность создавать оригинальные световые картины яркими пучками направленного света. Эти светильники обычно не имеют привычного абажура или плафона, они мало заметны, но имеют решающее значение в создании светового решения интерьера или экстерьера. Одной из последних новинок в этой группе светильников являются светильники,двигающиеся по заданной программе, арматура которых несет в себе миниатюрную электронику. Такой светильник можно запрограммировать на сложные движения пучка света, причем цвет освещения может изменяться по заданной программе. Такой «танцующий» свет (рис.2.) делает интерьер живым и подвижным, привлекая внимание то к одному его элементу, то к другому. Эти светильники используются для освещения торговых залов, кафе, кинотеатров и других мест досуга.



Рис. 2. Светильники направленного действия

Опволоконные светильники на основе полимерных оптических волокон используются в освещении, как правило, небольших помещений и комнат, позволяя создавать эффектные

световые панно. Пример такого оптоволоконного светильника показан на рисунке 3. Освещаемые ими объекты не нагреваются, так как на светогенераторе стоят тепловые фильтры, задерживающие тепловую часть спектра излучения галогенной лампы. Генератор света на основе эффективной галогенной лампы скрыт от глаз, от него идет длинный пучок световодов, которые доставляют точечный, яркий, искрящийся свет в определенном направлении.



Рис. 3. Оптоволоконные светильники

Встроенные потолочные светильники (рис.4.) стали популярны с появлением в отделке помещений подвесных потолков, на которых реализуются целые осветительные системы, в которые могут быть интегрированы звукопоглощающие, климатические и противопожарные устройства. Современные потолочные светильники по замыслу дизайнера могут быть рассредоточены по потолку в задуманном порядке (или беспорядке). Такие светильники отвечают самым высоким эстетическим запросам и активно успешно заменяют привычные подвесные светильники.



Рис. 4. Встроенные потолочные светильники



Рис. 5. Типы ламп и их характеристики

Лампы - это основная составляющая часть светильников любого вида, они имеют ряд характеристик (световой поток, мощность, срок службы), которые необходимо учитывать при проектировании освещения.

Все источники света делятся на: тепловые (лампы накаливания, галогенные лампы), энергосберегающие, светодиодные лампы. Их сравнительные характеристики представлены на рисунке 5.

Лампа накаливания долгие годы пользуется массовым спросом. Она состоит из цоколя, вольфрамовой нити накаливания и стеклянной колбы, наполненной инертным газом. Из-за постепенного переноса материала вольфрамовой нити в виде паров на колбу, лампа мутнеет и со временем ее яркость понижается. Подавляющее большинство ламп выпускается с цоколями E27 (резьбовые, с диаметром резьбы 27 мм) и миньон - E14 (резьбовые, с диаметром резьбы 14 мм). Срок службы ламп накаливания - 1000 часов.

Энергосберегающие лампы представляют собой газоразрядные ртутные лампы низкого давления. Термин «энергосберегающая лампа» сегодня применяют к люминесцентной лампе, которую можно установить вместо обычной лампы накаливания без всяких переделок. Компактная люминесцентная лампа состоит из 3 компонентов: цоколя, люминесцентной лампы и электронного блока. Цоколь предназначен для подключения лампы к сети. Электронный блок (ЭПРА: электронный пускорегулирующий аппарат) обеспечивает зажигание (пуск) и дальнейшее горение люминесцентной лампы. ЭПРА преобразует сетевое напряжение 220В в напряжение, необходимое для работы люминесцентной лампы. Светоотдача люминесцентной лампы очень высока, примерно 40-80 лм/Вт, цветопередача - около 85%, срок службы - 10 000 часов.

Светодиодные лампы имеют принципиально важные характеристики: низкое потребление электроэнергии, длительный срок службы, относительно низкая чувствительность к механическим воздействиям (вибрациям), разностям температур и повышенной влажности, экологичность и безопасность. В качестве источника света в них задействован светодиод, представляющий собой полупроводниковое устройство, которое при пропускании через него электрического заряда излучает свет (рис. 6.). Цвет светодиодной лампы во многом зависит от состава полупроводникового элемента - кристалла. Срок службы светодиодных ламп при непрерывной нагрузке достигает 30 000 - 100 000 тысяч часов. Переводя в более привычные единицы измерения, мы имеем срок службы лампы сроком около 36-ти лет.

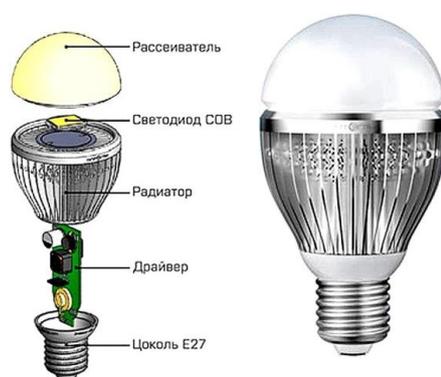


Рис. 6. Светодиодная лампа

Ниже приведены современные модели светодиодных светильников для внутреннего помещения.

Израильская Studio Cheha (рис.7) разработала светодиодные лампы, которые кажутся объемными.



Рис. 7. Объемные светодиодные лампы Studio Chena

Необычный осветительный прибор (рис. 8) предложил японский дизайнер Оки Сато (Оки Sato), создав уникальную коллекцию: подвесные светильники и торшеры одновременно являются и душевыми лейками. Основатель студии Nendo создал гибрид двух самых обычных предметов интерьера, встречающихся в каждом доме: это лампа и душ. Таким образом, границы между гостиной и ванной комнатой стираются и становятся игрой, а потоки воды делают световые лучи осязаемыми и живыми. С коллекцией WaterDream можно купаться под лампой или читать под душем.



Рис. 8. Осветительный прибор, разработанный японским дизайнером Оки Сат.

Необычными дизайнерскими светодиодными светильниками считаются светильники [Lumio](#), показанные на рисунке 9. Дизайнеры развили идею подсветки для книг до создания необычного ночного светильника. Свет включается при открывании обложки и выключается при закрывании. Книжка толщиной всего в 2,5 см помещается в обычной сумке, ящике стола или на полке, и используется только тогда, когда в ней возникает потребность. Беспроводные технологии позволяют установить лампу-книгу практически в любом месте. Сильные магниты удерживают книгу в развернутом положении на металлической поверхности.



Рис. 9. Свительник Lumio.

Дизайнер из Лос-Анджелеса Пол Фоклер (Paul Foeckler) создает **деревянные светильники (рис.10)**, из кипариса. Большинство светильников дают верхний или нижний свет, а модели Фоклера источают его через трещины в дереве. **Дизайнерские светодиодные светильники** являются очень экономичными, а причудливый дизайн понравится любителям современных стилей дизайна интерьера. Светильник заряжается с помощью USB-разъема, а также может превращаться в источник питания для других устройств.

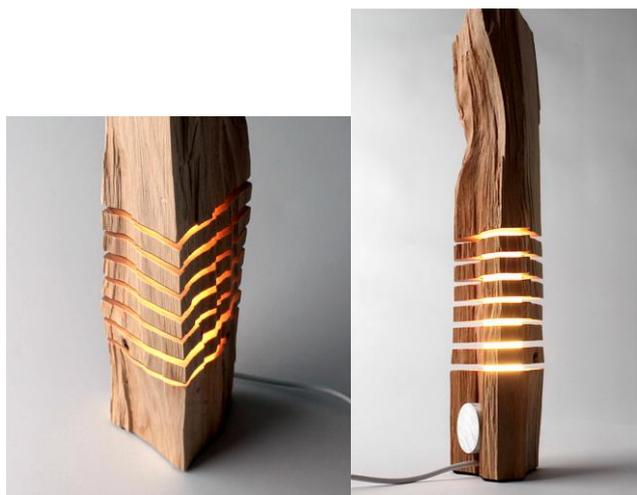


Рис.10. Деревянный светильник из кипариса.



Рис.11.Веревочные светильники

Источником вдохновения немецкого дизайнера Кристиана Хааса (Christian Haas) при создании светильников послужили обычные веревки и канаты (рис. 11), которые он вяжет морскими узлами, переплетает по технике макраме, а затем превращает каждую веревочную композицию в оригинальный декоративный светильник из серии Ropes Light.

В результате проведенного дизайн-исследования современного освещения был сделан вывод, что все разработанные на настоящий момент конструкции светильников для

искусственного освещения открытых и закрытых пространств или отдельных объектов осуществляется посредством осветительных установок, имеющих как свои достоинства, так и недостатки, но дизайнеры успешно применяют их для реализации своих замыслов.

Литература

1. *В. Папанек*. Дизайн для реального мира. – М.: Д.Аранов, 2012.
2. *Лора Слэк*. Что такое дизайн продукта? - Серия: Справочники по основам дизайна, - АСТ, Астрель, 2008 г.
3. *Н. Райли*. Элементы дизайна. – М.: Магма, 2004.
4. *Судаков К.В.* Физиология. Основы и функциональные системы: Курс лекций — М.: Медицина, 2000 - 784 с.
5. [http://zhurnalko.net/=sam/sdelaj-sam-\(izdatelstvo-znanie\)/2009-01--num88](http://zhurnalko.net/=sam/sdelaj-sam-(izdatelstvo-znanie)/2009-01--num88)
6. <http://www.trendhunter.com>
7. <http://www.novate.ru/blogs/050912/21461/>
8. <http://ribalych.ru/2014/05/31/samye-krutye-dizajnerskie-resheniya-etogo-mesyaca/>

УДК 658.512.23

КОНСТРУКЦИЯ СОВРЕМЕННОГО МОДУЛЬНОГО СТЕЛЛАЖА

Галина Валерьевна Кулагина

Студент 6 курса

кафедра «Промышленный дизайн»

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: А.С. Синельников,

ассистент кафедры «Промышленный дизайн»

Будущее человечества неразрывно связано с всё более усиливающимся техническим прогрессом, который несмотря на переход от индустриальной эпохи к информационной, требует всё большего количества ресурсов – в том числе пространства и времени.

Именно ограниченность в ресурсах, при решении своих жилищных проблем, делает таким популярным эконом-сегмент недвижимости в больших городах, где цена квадратного метра очень высока. Квартиры небольшого метража становятся всё более востребованными, особенно у молодёжи нашей страны, но вместе с тем требуют экономного и рационального использования пространства.

При разработке проекта были поставлены следующие задачи: сделать вместительный, модульный стеллаж, который не занимал бы много места, но при этом был современным, функциональным, удобным в использовании, надёжным и легко трансформирующимся под задачи владельца.

Проведённый анализ определил основные варианты существующих сегодня модульных стеллажей, представленных на Рисунке 1 и Рисунке 2.



Рис. 25. Системы хранения в гардеробных комнатах



Рис. 26. Системы хранения в магазинах

В рассмотренных модульных стеллажных конструкциях были выявлены следующие недостатки:

- Занимают много места
- Мало вариантов трансформации
- Мало эстетичны
- Не подходят для жилых помещений

Все эти недостатки были учтены при создании конструкции модульного стеллажа "Организатор пространства", взрыв-схема которой представлена на Рисунке 3. В качестве несущей использована многосоставная задняя стенка, каждый элемент которой имеет возможность крепления к стене, что позволяет отказаться от корпуса и каркаса, целиком подчинив внешний вид стеллажа его прямому назначению. Использование ткани в качестве настила полок облегчает и удешевляет конструкцию. Применяемые в качестве консолей, стержни с внутренним прижимным механизмом, позволяют легко и разнообразно трансформировать конфигурацию полок под задачи владельца.

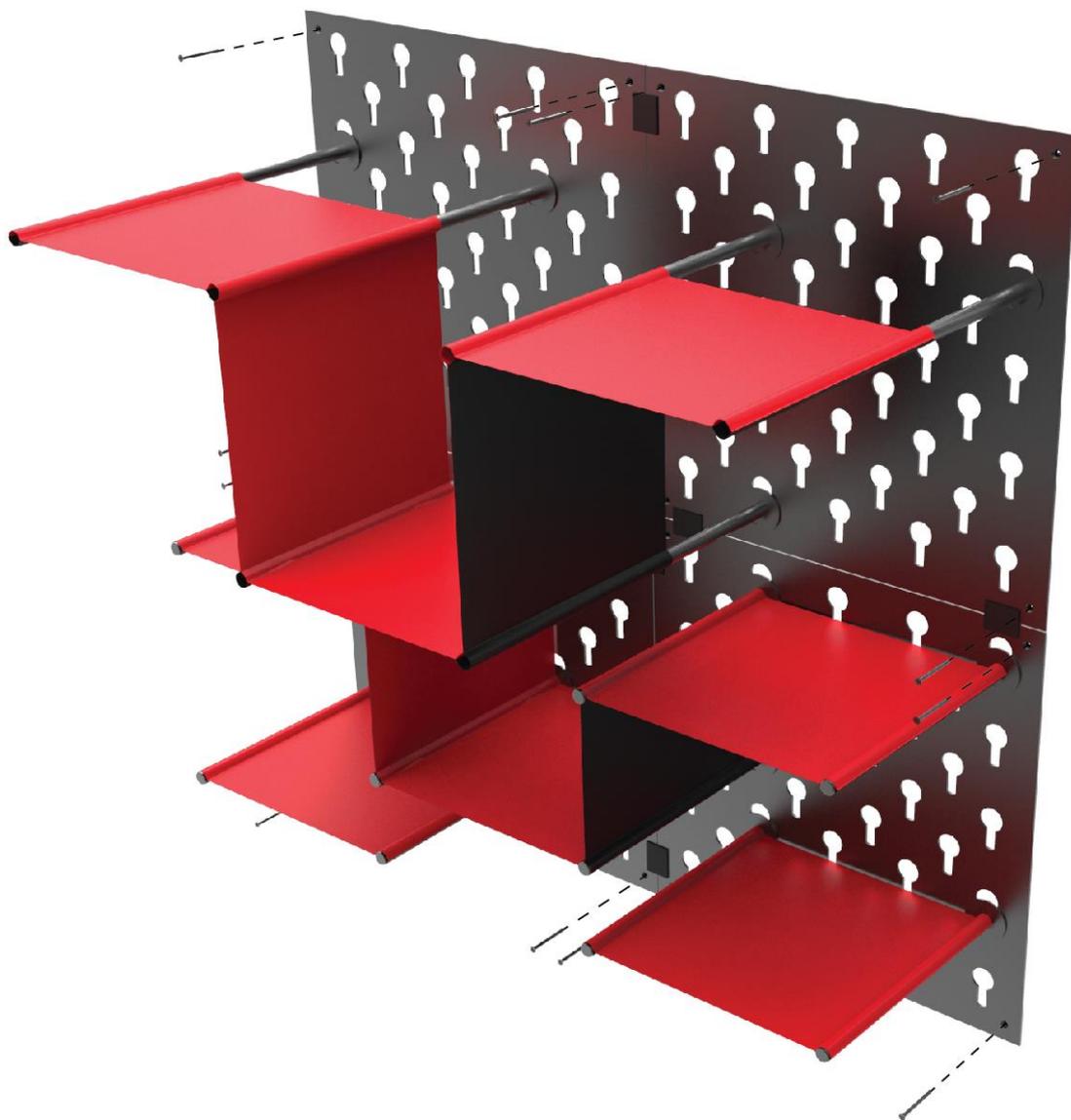


Рис. 3. Взрыв-схема конструкции модульного стеллажа "Организатор пространства"

Описание конструкции и используемых материалов модульного стеллажа "Организатор пространства", представленных на Рисунке 4 и Рисунке 5:

- Несущие многосоставные панели перфорированы под прижимной механизм стержней-консоль, крепятся к стене, имея ограничители прилегания и сделаны из дюралюминия или нержавеющей стали толщиной 3 мм.
- Соединительные элементы панелей сделаны из пластика в цвет панелей или ткани.
- Стержни-консоли оснащены поворотной головой управления внутренним прижимным механизмом, стопором ткани и сделаны из дюралюминия или нержавеющей стали.
- Стекловолоконная ткань настила полок не тянется, состоит из двух разноцветных слоёв и прошита с определённым интервалом. По всей длине заднего края ткани сделаны отверстия, на каждом слое под крепления за стопор, что не позволяет ткани "сползть" со стержней-консоль.

Схема панели

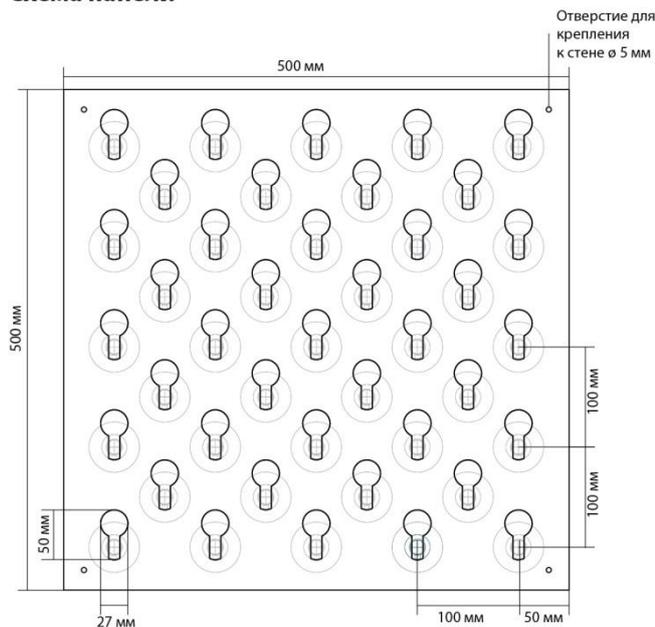


Схема соединительного элемента

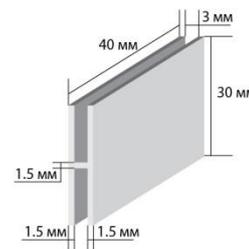


Схема стержня-консоли

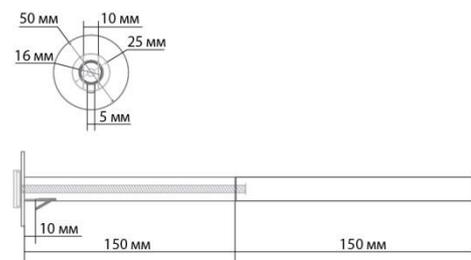


Схема прижимного механизма

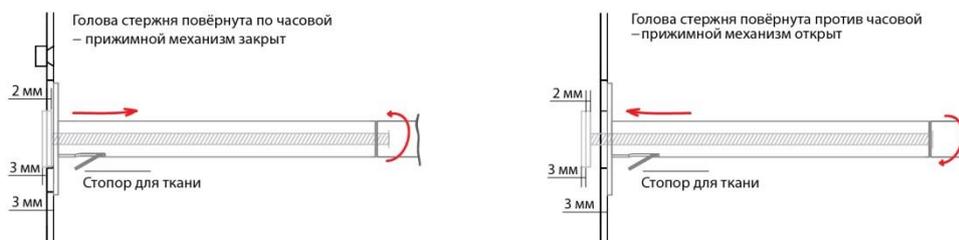


Рис. 4. Конструкция модульного стеллажа "Организатор пространства"

Схема прошивки ткани

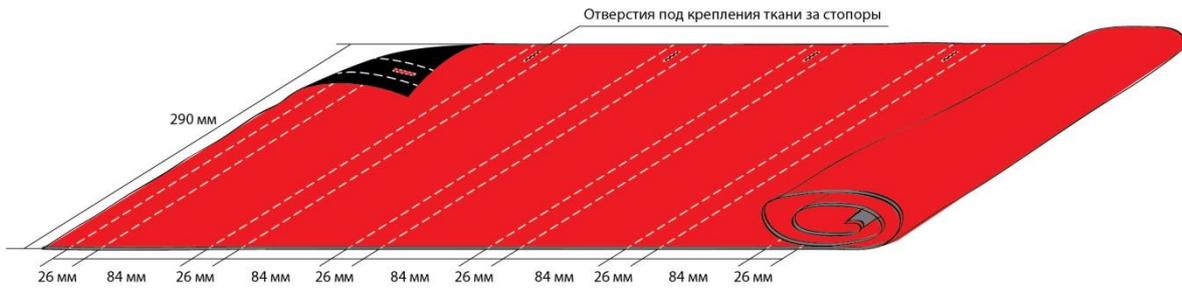


Рис.5. Конструкция модульного стеллажа "Организатор пространства"

На Рисунке 6 и Рисунке 7 показаны – задняя часть несущей панели с ограничителями её прилегания к стене, и стержни-консоли со стопорами ткани в свободном и зафиксированном на панели состоянии.

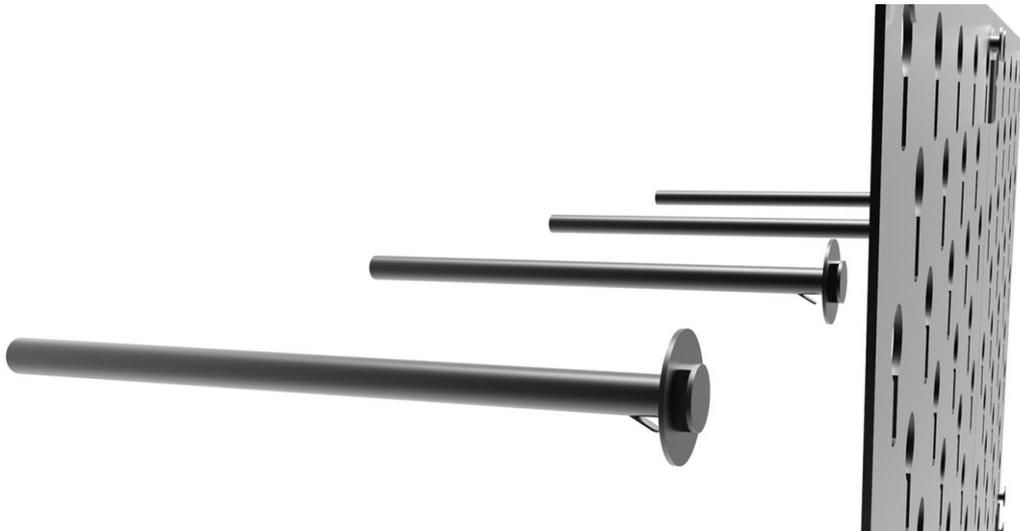


Рис. 6. Стержни-консоли в свободном состоянии

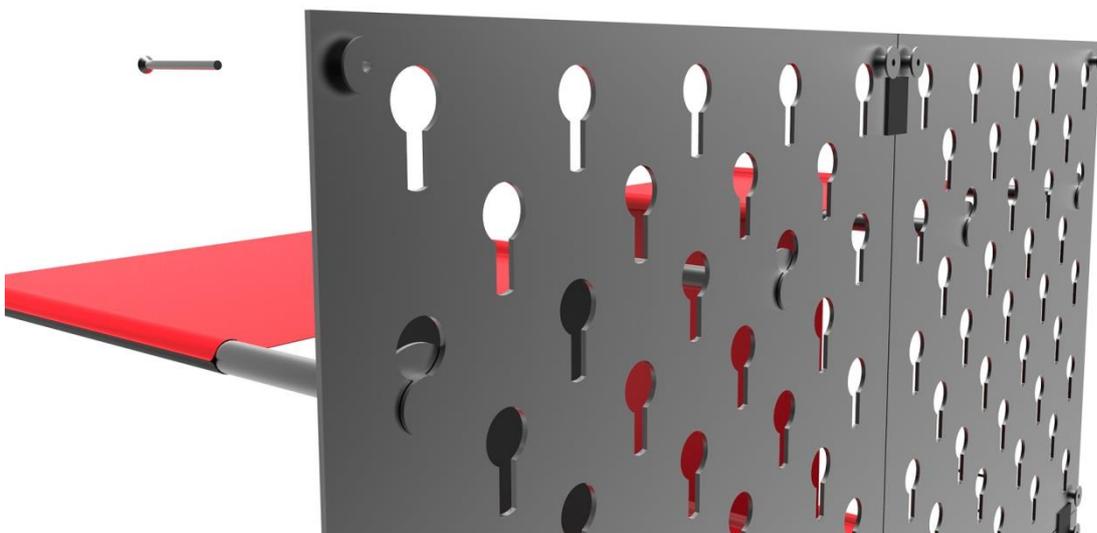


Рис. 7. Стержни-консоли зафиксированы на несущей панели

Рисунок 8 и Рисунок 9 дают возможность оценить использование модульного стеллажа "Организатор пространства" в различных вариантах интерьера.

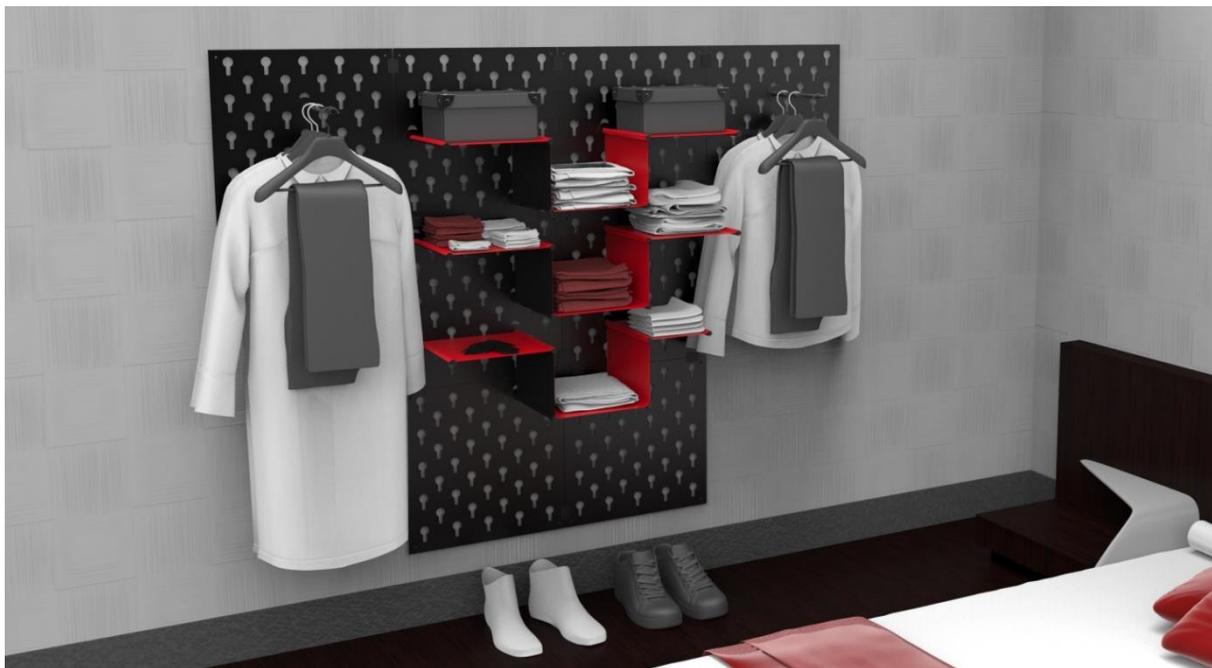


Рис. 8. Использование модульного стеллажа "Организатор пространства" в жилой комнате



Рис. 9. Использование модульного стеллажа "Организатор пространства" в гостиной

В результате дизайнерской разработки удалось найти простое, эстетичное решение пользовательских проблем, создав надёжный, функциональный стеллаж, размеры которого варьируются от 500x500 мм до бесконечности, в люксовом (нержавеющая сталь) и бюджетном

(дюралюминий) исполнении. Представленный модульный стеллаж "Организатор пространства" занимает минимальную площадь, легко и разнообразно меняет конфигурацию полок, делая доступ к хранимым предметам быстрым и удобным.

Литература

1. Михайлов С. М., Кулеева Л. М. Основы дизайна : учеб. пособие для вузов / Михайлов С. М., Кулеева Л. М. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Союз Дизайнеров, 2002. - 240 с. : ил. - Библиогр. в конце гл. - ISBN 5-901512-06-5.
2. Михеева М. М., Общие принципы дизайн-проектирования, Методическое пособие
3. Михеева М. М., Пособие по курсу дизайн-исследования, 2012 г.
4. Калиничева М. М., Решетова М. В. Техническая эстетика и дизайн : словарь общ. ред. Калиничева М. М. - М. : Культура : Академический Проект, 2012. - 354 с., [16] л. ил. - (Summa). - ISBN 978-5-902767-50-3. - ISBN 978-5-8291-1384-1.
5. Сайт производителя дюралюминия <http://al-metall.ru/durallist>
6. Сайт производителя нержавеющей стали <http://standard-steel.ru/catalog/rolled/sheets.php>

Секция X

Оборудование и технологии прокатки

Председатель:

Семенов Иван Евгеньевич

доктор технических наук, профессор кафедры
«Оборудование и технологии прокатки»

Ученый секретарь:

Шинкарев Александр Сергеевич

ассистент кафедры «Оборудование и технологии
прокатки» (МТ-10)

УДК 669.019.02/09

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДА СТАНА ДУО-КВАРТО 320 ХП

Рамиль Вильданович Абдряшитов

Студент 6 курса

кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.А. Мальцев

кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»

Объектом исследования является электропривод (валопровод) реверсивного прокатного стана [1] дуо-кварто 320 ХП, предназначенного для холодной прокатки листов и полосы толщиной от 3...4 мм до 0,1 мм с допуском 10% и шириной 100...200 мм из прецизионных сплавов – пермаллой, пермендюр, сплавов инварного и эливарного классов на основе Fe-Ni-Co [2]. Эти высоколегированные прецизионные сплавы требуют узких пределов содержания элементов в химическом составе, специальной выплавки и обработки.

Прецизионные сплавы согласно ГОСТ 10994-74 «Сплавы прецизионные. Марки» подразделяют в зависимости от основных свойств на следующие группы:

I — магнитно-мягкие, обладающие высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой в слабых полях;

II — магнитно-твердые сплавы с заданным сочетанием параметров предельной петли гистерезиса или петли гистерезиса, соответствующей полю максимальной проницаемости;

III — сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения;

IV — сплавы с заданными свойствами упругости, обладающие высокими упругими свойствами в сочетании с другими специальными свойствами (повышенной коррозионной устойчивостью, повышенной прочностью, низкой магнитной проницаемостью, заданными значениями модуля нормальной упругости и температурным коэффициентом модуля упругости);

IV — сверхпроводящие сплавы, характеризующиеся специальными электрическими свойствами в области низких температур;

V — сверхпроводящие сплавы, характеризующие специальными электрическими свойствами в области низких температур;

VI — сплавы с высоким электрическим сопротивлением, обладающие необходимым сочетанием электрических и других свойств;

VII — термобиметаллы, представляющие материал, состоящий из двух или более слоев металлов или сплавов с различными температурными коэффициентами линейного расширения, разность которых обеспечивает его упругую деформацию при изменении температуры.

Химические элементы в марках обозначены следующими буквами: Б — ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, К — кобальт, Л — бериллий, М — молибден, Н — никель, Р — бор, С — кремний, Т — титан, Ю — алюминий, Х — хром, Ф — ванадий.

Прецизионные сплавы применяются в электротехнике как магнитно-мягкие, магнитно-твердые, сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения, с заданными свойствами упругости, сверхпроводящие сплавы, сплавы с высоким электрическим сопротивлением, термобиметаллы. Незаменимы при изготовлении узлов особо чувствительных приборов и установок, уникальной экспериментальной и малогабаритной аппаратуры, различного рода датчиков, преобразователей энергии. Они используются также в бытовой технике, например в телевизорах, радиоприёмниках, часах и т.д.

К прецизионным сплавам относятся инвар, элинвар, манганин, константан, перминвар, пермендюр, пермаллой, алюмель, хромель, копель, ковар, платинит и феррико. Их поставляют в виде тонкой ленты, проволоки, поковок, листов, прутков и монокристаллов.

Инвар — это прецизионный железоникелевый сплав (36% никеля), имеющий малый коэффициент теплового расширения ($1,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ при температуре от -80 до 100°C) благодаря тому, что магнитострикционное уменьшение объема при нагреве компенсирует тепловое расширение. Магнитострикция, открытая Джоулем еще в 1842 году, заключается в изменении формы и размеров тела при намагничивании, достигает наибольшей величины в ферромагнетиках и ферримангнетиках (железо, никель, кобальт), а в антиферромагнетиках, парамагнетиках и диамагнетиках магнитострикция, наоборот, очень мала. Используется для изготовления геодезических проволок и лент, линеек, деталей измерительных и контрольных приборов. Температура плавления инвара — 1430°C , предел прочности — 490 МН/м^2 . Инвар обладает малым температурным коэффициентом линейного расширения, он практически не расширяется при температурах от -100 до $+100^\circ\text{C}$.

Элинвар — это прецизионный сплав на железоникелевой основе (45% никеля), легированный хромом, молибденом и ванадием, упругие свойства которого мало зависят от температуры. Физическая природа аномалии упругих свойств элинвара — магнитная, поэтому выше Кюри точки аномалия пропадает. Элинвар применяют для изготовления часовых волосков, ультразвуковых линий задержек, резонаторов электромеханических фильтров, мембран, пружин и других деталей, от которых требуются упругие свойства, не зависящие от температуры.

Манганин — это прецизионный сплав на основе меди с добавкой марганца (от 11,5 до 13,5 %) и никеля (от 2,5 до 3,5 %) с чрезвычайно малым изменением электрического сопротивления в области комнатных температур. Из манганина изготавливают эталонные сопротивления и элементы измерительных приборов, он используется в приборах высокого класса точности. Манганин чувствителен к значительному изменению влажности воздуха и неустойчив к коррозии в атмосфере.

Константан — это прецизионный медно-никелевый сплав (от 39 до 41% никеля, от 1 до 2% марганца, остальное — медь), характеризующийся слабой зависимостью электрического сопротивления от температуры. Удельное электрическое сопротивление константана при температуре 20°C намного превышает $0,48 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, температурный коэффициент электрического сопротивления после стабилизирующего отжига составляет около $2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$, температура плавления 1260°C . Применяется в электротехнике для изготовления реостатов, элементов измерительных приборов. Недостаток — большая термоэлектродвижущая сила (около 39 мкВ/K). С медью или железом константан образует термопару, пригодную для измерения температур до 500°C .

Перминвар — это прецизионный сплав никеля (45%) с железом (30%) и кобальтом (25%) с добавками молибдена и хрома, характеризуется малой зависимостью магнитной проницаемости от напряженности поля. Относится к магнитно-мягким материалам. Точка Кюри — 600°C . Используются для изготовления высокостабильных сердечников трансформаторов и дросселей с минимальными искажениями преобразуемого сигнала.

Пермендюр — это прецизионный сплав железа (от 47 до 50 %) с кобальтом (от 48 до 50 %) и с небольшой добавкой ванадия (от 1,5 до 2 %), обладает свойством насыщения магнитной проницаемости при очень высоких значениях индукции магнитного поля (от 2 до $2,4 \text{ Тл}$).

Пермаллой — это прецизионный сплав никеля (от 40 до 83 %) с железом (17%), обладающий магнитно-мягкими свойствами: высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезис. Дополнительно легируется молибденом (4%), хромом, медью и кремнием. Точка Кюри — 400°C . Обычно поставляется в виде лент

толщиной от 0,003 до 0,5 мм. Используется в радиотехнике, автоматике и вычислительной технике.

Алюмель — это прецизионный сплав (1,8—2,5 алюминия; 0,85—2,0 кремния; 1,8—2,2 марганца; остальное — никель и кобальт, причём кобальт присутствует как примесь в никеле, и для обеспечения требуемого значения термоЭДС его содержание должно быть в пределах от 0,6 до 1,0%. Легирование алюмеля цирконием (от 0,06 до 0,1%) и бором (от 0,005 до 0,03%) значительно увеличивает его пластичность при температуре от 600 до 1100 °С и длительную прочность при температуре от 700 до 900°С. Применяется в пирометрии в термопарах для измерений температуры до 1000°С.

Хромель — это прецизионный сплав никеля с хромом, обладающий благоприятным сочетанием термоэлектрических свойств и жаростойкости. Содержит около 10% Cr, около 1% Co, а также примеси (до 0,2% C и до 0,3% Fe). Характеризуется значительным изменением термоЭДС в широком интервале температур. ТермоЭДС термопары хромель – платина при температурах спаев 1000 и 0 °С — около 33 мВ. Имеет постоянное значение термоЭДС в интервале температур от 20 до 1000 °С. Изготавливается в виде проволоки и применяется в паре с алюмелем в качестве положительного термоэлектрода термопары хромель – алюмель, которая используется при измерении температуры. В России выпускают Хромель марок НХ9,5 и НХ9.

Копель — это прецизионный сплав меди, никеля (43%) и марганца (0,5%) Температура плавления копели около 1290 °С. Из всех медно никелевых сплавов копель обладает максимальной термоэлектродвижущей силой в паре с хромелем (около 6,95 мВ при 100°С, 49,0 мВ при 600°С). Применяется главным образом в пирометрии в качестве отрицательного термоэлектрода термопар при измерении температур до 600 °С. В России изготавливается копель марки МНМц 43 — 0,5.

Ковар — это прецизионный сплав на основе железа, содержит 18% Co и 29% Ni. Характеризуется низким коэффициентом теплового расширения от 4,5 до $5,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ — в интервале от 20 до 400 °С, близким к коэффициенту теплового расширения стекла. Температура плавления ковара — 1450 °С. Удельное электрическое сопротивление 0,5мкОм·м, точка Кюри — 420 °С. Подвержен водяной коррозии и требует защитных покрытий. При впайке в стекло ковар образует прочное вакуумно-плотное сцепление, что используется в электровакуумной технике при изготовлении различных ламп.

Платинит — это прецизионный сплав в виде биметаллической проволоки, состоящей из железо-никелевого сердечника (58% железа, 42% никеля), покрытого тонким слоем меди (около 30% от общей массы проволоки). Коэффициент теплового расширения платинита близок к коэффициенту теплового расширения платины равному $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, поэтому платинит заменяет платину в осветительных лампах и электровакуумных приборах.

Фернико — это прецизионный сплав железа, никеля (31%) и кобальта (15%), имеющий температурный коэффициент линейного расширения, близкий к коэффициенту тугоплавкого стекла. Применяется в спаях со стеклом в узлах электровакуумных приборов, работающих при температурах ниже –80 °С. Коэффициент теплового расширения в интервале от 20 до 500 °С составляет $6,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Кроме прецизионных сплавов прокатываются термобиметаллы, состоящие из двух или нескольких слоев металлов или сплавов с различными температурными коэффициентами линейного расширения, сваренных между собой по всей плоскости соприкосновения. Согласно ГОСТу 10533-86 «Лента холоднокатаная из термобиметаллов. Технические условия» термобиметаллическую ленту изготавливают в рулонах, сварных рулонах или отрезках длиной от 500 до 1200 мм. Внутренний диаметр рулона — не менее 400 мм для ленты толщиной 0,80 мм и более, не менее 250 мм — для ленты толщиной от 0,41 до 0,80 мм и не менее 100 мм — для ленты толщиной 0,40 мм. Холоднокатаную ленту изготавливают шириной от 10 до 250 мм и толщиной от 0,1 до 2,0 мм из марок ТБ 148/79, ТБ 138/80, ТБ 129/79, ТБ 107/71, ТБ 103/70, ТБ

73/57, а также толщиной от 0,4 до 2,0 мм из марок ТБ 200/113, ТБ 160/122. Ленту в отрезках изготавливают толщиной от 0,1 до 2,5 мм включительно, шириной от 10 до 250 мм. Ленту шириной от 10 до 60 мм изготавливают с градацией 5 мм, шириной от 70 до 100 мм с градацией 10 мм, шириной более 100 мм — с градацией 20 мм. Основное оборудование прокатного стана дуо-кварто 320 ХП, включающее рабочую клеть с ее электроприводом, предназначено для выполнения главной операции — деформации металла прокатываемой заготовки между двумя вращающимися рабочими валками (рис.1).



Рис. 1. Стан дуо-кварто 320 ХП

В состав рабочей клетки входят сменные кассеты рабочих валков дуо, сменные кассеты рабочих валков кварто; нажимные и уравнивающие устройства. Сюда же можно отнести правый и левый проводковые столы, а также правую и левую привалковую арматуру.

Электропривод рабочей клетки (главный электропривод) состоит из электродвигателя, моторной муфты, комбинированного 3-ступенчатого редуктора, включающего ступень шестеренной клетки с передаточным отношением, равным единице, верхнего и нижнего универсальных шпинделей.

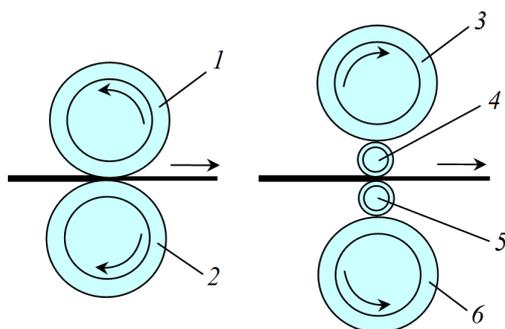


Рис. 2. Двухвалковая (слева) и четырехвалковая (справа) схемы прокатки ленты в рабочей клетке дуо-кварто 320:
1, 2, 4, 5 — рабочие валки; 3, 6 — опорные валки

Вспомогательное оборудование содержит рольганг, ножницы продольной и поперечной резки, сварочный аппарат, правильную машину, правую и левую моталки консольного типа со своими электроприводами.

В процессе проведения экспериментов по прокатке сутунок на стане дуо-кварто 320 ХП, осуществляемой с большими обжатиями, после ударного захвата заготовки рабочими валками, на некотором участке или сразу нескольких участках валопровода могут возникнуть высокоамплитудные крутильные колебания. Если это произойдет, появляется опасность накопления усталостных повреждений в материале той или иной детали валопровода (вал шпинделя), что рано или поздно приведет к усталостному разрушению этой детали, скорее всего, в ее опасном сечении. Поэтому необходимы как теоретический расчет амплитуд и форм крутильных колебаний, так и экспериментальные исследования методом тензометрии.

Теоретический расчет выполнен на ЭВМ, для чего была построена математическая модель в среде MathCAD [3].

Дифференциальные уравнения движения крутильно-колеблющихся масс записаны на основании уравнений Лагранжа II рода.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} + m_1 = M_1 \\ J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} - m_1 + m_2 = 0 \\ J_3 \frac{d^2\varphi_3}{dt^2} - m_2 + m_3 + m_4 = 0 \\ J_4 \frac{d^2\varphi_4}{dt^2} - m_3 = -M_2 \\ J_5 \frac{d^2\varphi_5}{dt^2} - m_4 = -M_3 \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = \frac{M_1 - m_1}{J_1} \\ \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = \frac{m_1 - m_2}{J_2} \\ \frac{d^2\varphi_3}{dt^2} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} \\ \frac{d^2\varphi_4}{dt^2} = \frac{m_3 - M_2}{J_4} \\ \frac{d^2\varphi_5}{dt^2} = \frac{m_4 - M_3}{J_5} \end{array} \right. \quad (1)$$

где m_1, m_2, m_3, m_4 — внутренние моменты, возникающие при скручивании упругих связей;

$$\begin{aligned} m_1 &= c_1(\varphi_1 - \varphi_2) \\ m_2 &= c_2(\varphi_2 - \varphi_3) \\ m_3 &= c_3(\varphi_3 - \varphi_4) \\ m_4 &= c_4(\varphi_3 - \varphi_5) \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2\psi_1}{dt^2} = \frac{M_1 - m_1}{J_1} - \frac{m_1 - m_2}{J_2} \\ \frac{d^2\psi_2}{dt^2} = \frac{m_1 - m_2}{J_2} - \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} \\ \frac{d^2\psi_3}{dt^2} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} - \frac{m_3 - M_2}{J_4} \\ \frac{d^2\psi_4}{dt^2} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} - \frac{m_4 - M_3}{J_5} \end{array} \right. \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} m_1 &= c_1\psi_1; \quad \psi_1 = (\varphi_1 - \varphi_2) \\ m_2 &= c_2\psi_2; \quad \psi_2 = (\varphi_2 - \varphi_3) \\ m_3 &= c_3\psi_3; \quad \psi_3 = (\varphi_3 - \varphi_4) \\ m_4 &= c_4\psi_4; \quad \psi_4 = (\varphi_3 - \varphi_5) \end{aligned}$$

Далее для удобства программирования в среде MathCAD система из четырех дифференциальных уравнений второго порядка (2) преобразована в систему из восьми дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} = \psi_5 \\ \frac{d\psi_2}{dt} = \psi_6 \\ \frac{d\psi_3}{dt} = \psi_7 \\ \frac{d\psi_4}{dt} = \psi_8 \\ \frac{d\psi_5}{dt} = \frac{M_1 - m_1}{J_1} - \frac{m_1 - m_2}{J_2} \\ \frac{d\psi_6}{dt} = \frac{m_1 - m_2}{J_2} - \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} \\ \frac{d\psi_7}{dt} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} - \frac{m_3 - M_2}{J_4} \\ \frac{d\psi_8}{dt} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} - \frac{m_4 - M_3}{J_5} \end{cases} \quad (3)$$

Моменты сил упругости с учетом демпфирования и люфтов имеют вид

$$m_1 = \begin{cases} c_1(\psi_1 - \Delta_1) + \beta_1\psi_5, & \psi_1 > \Delta_1 \\ 0, & -\Delta_1 \leq \psi_1 \leq \Delta_1 \\ c_1(\psi_1 + \Delta_1) + \beta_1\psi_5, & \psi_1 < -\Delta_1 \end{cases} \quad m_2 = \begin{cases} c_2(\psi_2 - \Delta_2) + \beta_2\psi_6, & \psi_2 > \Delta_2 \\ 0, & -\Delta_2 \leq \psi_2 \leq \Delta_2 \\ c_2(\psi_2 + \Delta_2) + \beta_2\psi_6, & \psi_2 < -\Delta_2 \end{cases}$$

$$m_3 = \begin{cases} c_3(\psi_3 - \Delta_3) + \beta_3\psi_7, & \psi_3 > \Delta_3 \\ 0, & -\Delta_3 \leq \psi_3 \leq \Delta_3 \\ c_3(\psi_3 + \Delta_3) + \beta_3\psi_7, & \psi_3 < -\Delta_3 \end{cases} \quad m_4 = \begin{cases} c_4(\psi_4 - \Delta_4) + \beta_4\psi_8, & \psi_4 > \Delta_4 \\ 0, & -\Delta_4 \leq \psi_4 \leq \Delta_4 \\ c_4(\psi_4 + \Delta_4) + \beta_4\psi_8, & \psi_4 < -\Delta_4 \end{cases}$$

Решение уравнений движения (3) найдено благодаря встроенной функции Rkadapt реализующей классический приближенный численный метод Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом интегрирования. В результате были построены графики моментов сил упругости на участках валопровода, где расположены универсальные шпиндели (рис 3).

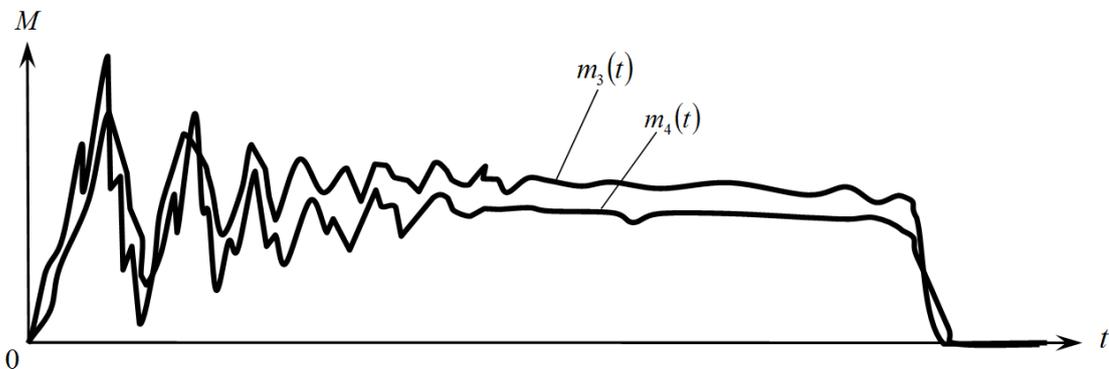


Рис. 3. Графики моментов сил упругости

Таким образом, для валопровода электропривода стана дуо-кварто 320 ХП выполнены все основные этапы динамического расчета: составлена 5-массовая разветвленная расчетная схема, определены ее инерционные, упругие и другие параметры; записаны и решены

дифференциальные уравнения движения масс, с учетом внешних нагрузок, приложенных со стороны электродвигателя и рабочих валков; построены графики моментов сил упругости.

Для эксплуатационной диагностики крутильных колебаний, возникающих на разветвленном участке валопровода стана дуо-кварто 320 ХП, где расположены его универсальные шпиндели, оказалась вполне пригодной тензометрическая аппаратура (тензоаппаратура) контроля энергосиловых параметров (сил и моментов прокатки), давно установленная на стане дуо-160 в лаборатории кафедры МТ10 (МГТУ имени Н.Э. Баумана). Два канала этой аппаратуры настроены на косвенное измерение крутящих моментов: первый канал — на валу верхнего шпинделя, второй — на валу нижнего.

До появления персонального компьютера тензоаппаратура контроля моментов прокатки состояла из двух тензорезисторных полумостов (тензополумостов), токосъемных колец (токосъемников), тензометрического усилителя (тензоусилителя) ТА-5 и шлейфового светолучевого осциллографа Н-700 для записи аналогового сигнала в виде осциллограммы на специальную светочувствительную фотобумагу УФ-67. После приобретения стационарного персонального компьютера 4-канальный усилитель ТА-5 заменили 6-канальным измерительным блоком Ш74/1, а осциллограф Н-700 изъяли из состава тензоаппаратуры. К первому каналу измерительного блока Ш74/1 подключили через токосъемник тензомост, спаянный из четырех тензорезисторов, наклеенных на вал верхнего шпинделя, а ко второму каналу — тензомост, спаянный из тензорезисторов, наклеенных на вал нижнего шпинделя.

Долгое время предпринимались попытки использовать в качестве АЦП обычную компьютерную звуковую карту, у которой имеются линейный и микрофонный аналоговые входы. Звуковая карта способна воспринимать и преобразовывать в цифровую форму аналоговый сигнал напряжением до 2В и частотой до 20 кГц. Существует ряд небольших и удобных программ, таких как программа Oscilloscope 2.51 для Windows, которые легко превращают персональный компьютер в виртуальный осциллограф, анализатор спектра и регистратор данных. Звуковая карта не является полноценным АЦП и не предназначена для тензометрической аппаратуры. Кроме того, звуковую карту можно случайно вывести из строя, если по неосторожности подать на ее аналоговый вход сигнал напряжением выше 2В. Поэтому для безопасного подключения двух выводов измерительной диагонали тензомоста к звуковой карте (к моменту защиты дипломного проекта) планируем самостоятельно изготовить несложный делитель напряжения с потенциометром и стабилизаторами [4].

Литература

1. Колесников А.Г. Технологическое оборудование прокатного производства: учебное пособие / А.Г. Колесников, Р.А. Яковлев, А.А. Мальцев. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 158 с.
2. Руководство по эксплуатации 1399100 РЭ. Стан дуо-кварто 320 холодной прокатки.
3. Мальцев А.А. Исследование динамики и прогнозирование долговечности привода прокатного стана: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы динамики и надежности металлургического оборудования» – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 35 с.
4. Зубаль И. Компьютер в роли осциллографа, спектроанализатора, частотомера и генератора // Технический портал радиолюбителей России. http://www.cqham.ru/scope_07.htm.

УДК 621.77

РАЗВИТИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В РОССИИ

Александр Сергеевич Бойко

Студент 3 курса

кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: М.О. Миронова

ассистент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»

В настоящее время с учетом сложившейся внешнеполитической ситуации для устойчивого развития экономики нашей страны особенно актуальной становится проблема импортозамещения продукции не только легкой, но и тяжелой промышленности, в частности станков и оборудования.

Металлургическое машиностроение в СССР стало быстро развиваться в годы первых пятилеток в связи с развитием металлургической промышленности. В 1929—1932 годах был построен Иркутский завод тяжёлого машиностроения, в 1933—1934 годах введены в действие 2 крупнейших завода — Уралмашзавод им. С. Орджоникидзе (Свердловск) и Новокраматорский машиностроительный завод (Краматорск). Одновременно со строительством новых заводов реконструировались действующие предприятия, создавались технические службы, обучались кадры. К началу Великой Отечественной войны СССР располагал значительными мощностями по производству металлургического оборудования. Во время войны были построены Южно-Уральский машиностроительный завод, Электростальский и Алма-Атинский заводы тяжёлого машиностроения.

Сформированный в прошлом производственный уклад опирался только на собственные силы. Машиностроение было ориентировано, в основном, на нужды оборонной промышленности, а также жизнеобеспечивающих инфраструктурных отраслей — топливно-энергетического комплекса, электроэнергетики, железнодорожного транспорта. Многие предприятия дублировали друг друга, не конкурируя между собой. Сознательно проведенное в начале 1990-х годов многократное снижение оборонного заказа и не осознанное до конца столь же многократное снижение заказов машиностроителям со стороны «естественных» монополий предопределили нехватку денежных средств у предприятий, консервацию или перепрофилирование части мощностей, а, главное, общее падение производства, объем которого начал возрастать лишь после кризиса 1998 года.

В конце 90х - начале 2000х годов наметился подъем производства в машиностроении, но уже к 2002 году темпы упали ниже средних по промышленности, а другие показатели вернулись к прежнему докризисному уровню. Таким образом, ресурс положительного импульса, данного машиностроению в 1998 году, исчерпался.

Новый подъем в промышленности начался в 2003 году. Российское машиностроение стало оснащаться новым поколением программируемых металлообрабатывающих станков и увеличило объемы их производства.

В ноябре 2008 года российское машиностроение испытало самый глубокий за последнее десятилетие спад, однако крупные проекты не были заморожены и благодаря поддержке государства были закончены и введены в эксплуатацию.

В настоящее время развитие машиностроительного комплекса происходит на фоне следующих положительных тенденций:

- объединение активов производителей машиностроительной продукции и создание крупных металлургических компаний;

- увеличения объёмов государственной поддержки высокотехнологичных секторов экономики (авиастроение, судостроение, транспортное машиностроение, энергетическое машиностроение и др.).

Негативными тенденциями развития машиностроительного комплекса являются:

- агрессивная ценовая политика крупных транснациональных компаний, выходящих на отечественный рынок;
- высокий уровень использования импортных комплектующих в производстве продукции отдельных отраслей машиностроения (гидравлика и электроника).

Начиная с 2008 года, в России было построено несколько уникальных предприятий и цехов, которые на сегодняшний день являются конкурентоспособными на мировом рынке.

Литейно-прокатный комплекс (ЛПК) – уникальное предприятие, построенное по самым передовым в мире технологиям. Строительство ЛПК началось 11 июня 2005 года в Выксунском районе Нижегородской области. Генеральным подрядчиком строительства была выбрана турецкая строительная компания GAMA Endustri. Основным поставщиком технологического оборудования - итальянская компания Danieli&C. В реализации проекта участвовали десятки российских и иностранных предприятий. Проект был реализован в кратчайшие сроки – 3 года и 3 месяца. В мировой практике объекты такого масштаба возводятся за 5-6 лет.

В октябре 2008 года Объединенная металлургическая компания (ОМК) ввела новый завод в строй. Литейно-прокатный комплекс (ЛПК) первым в России освоил производство горячекатаного проката из тонких слябов (толщиной 70 и 90 мм) по наиболее экономичной технологии на основе совмещения непрерывной разливки и прокатки в едином технологическом процессе.

В 2009 году был введен в эксплуатацию Стан 5000 (г. Магнитогорск Челябинской области, ММК):

- Мощность: свыше 1,5 млн. тонн в год, в том числе около 0,3 млн. термически обработанного листа
- Ширина проката: до 4850 мм
- Марки стали: прочность до X120



Рис.1. Комплекс «Стан-5000» на Магнитогорском металлургическом комбинате

Предназначается для получения проката под трубную промышленность, в том числе для труб большого диаметра (1420 мм). Поставка осуществляется на ЧТПЗ, а также Выксунский металлургический завод.

На стане освоены технологии высокотемпературной и низкотемпературной прокатки, а также прокатки листов различной толщины и ширины, исходя из максимальных требований потребителей к трубам большого диаметра.

В июле 2010 года на Челябинском трубопрокатном заводе запущен новый цех по производству одношовных труб большого диаметра «Высота 239». «Высота 239» - это современное трубное производство в России с уникальными, экологически безопасными технологиями, обеспечивающими высокое качество труб, способное удовлетворить любые, в том числе перспективные, требования рынка трубопроводного транспорта. Челябинские трубы могут использоваться при прокладке трубопроводов через местность с вечной мерзлотой, в сейсмоопасных зонах, по дну морей.

В ноябре 2010 года компания ЧТПЗ (Челябинский трубопрокатный завод) запустила в эксплуатацию новый современный электросталеплавильный комплекс "Железный Озон 32" на Первоуральском новотрубном заводе. С выходом комплекса на полную мощность в 2011 году, он способен обеспечить 75% требуемых ЧТПЗ объемов заготовки для производства бесшовных труб. "Железный Озон 32" станет самым высокопроизводительным электросталеплавильным цехом в России: 950 тыс. тонн стали в год смогут выпускать всего чуть более 300 человек. Если средний показатель по России составляет 1,1 тыс. тонн на человека в год, то сталевар ЧТПЗ будет делать 3,4 тыс. тонн стали в год, то есть втрое больше.

25 ноября 2011 был построен и введен в эксплуатацию Стан 5000 (г. Выкса Нижегородской области, ВМЗ):

- Мощность: 1,5 млн. тонн в год
- Толщина листа: до 48 мм.
- Марки стали: прочность до X120

В 2011 году введена в строй первая на постсоветском пространстве доменная печь "Россиянка" на НЛМК (Новолипецкий металлургический комбинат). Пуск комплекса доменной печи и нового конвертера позволили увеличить мощности по производству стали в Липецке на 36% - до 12,4 млн. тонн в год.

В 2013 году завершено строительство предприятия ООО "НЛМК-Калуга". Производственные мощности предприятия составляют 1,5 млн. тонн в год жидкой стали и 0,9 млн тонн сортового и фасонного проката в год. Новое предприятие Сортового дивизиона Группы НЛМК позволит обеспечить качественным металлопрокатом строительного назначения центральные регионы России.

В 2013 году был запущен новый проект Челябинского металлургического комбината - универсальный рельсобалочный стан - это эксклюзивное для России, первое, созданное с нуля, производство длинномерных рельсов. Теперь наша страна будет изготавливать рельсы длиной до 100 метров. Именно такие нужны для того, чтобы сделать железнодорожные пути высокоскоростными. Благодаря применению передовых технологий прокатки, закалки, правки - дорогу из таких конструкций можно прокладывать в зонах с экстремальными температурными режимами, например, в условиях Крайнего Севера.

Раньше такие рельсы Россия закупала за рубежом. И этот проект снизит зависимость РЖД от импортных закупок длинномерных рельсов.

12 февраля 2014 года компания DanieliVolga (ООО "Даниели Волга", дочернее предприятие итальянского поставщика оборудования и установок для металлообрабатывающей промышленности Danieli) открыла машиностроительный завод по производству металлургического оборудования в Дзержинске Нижегородской области. Основной продукцией предприятия станут узлы машин непрерывного литья заготовок, прокатных станов, электропечей и т.д., основные потребители — сталелитейные и машиностроительные предприятия России, а также страны Таможенного союза и европейские предприятия.



Рис. 2. Рельсобалочный стан Челябинского металлургического комбината

26 января 2015 года Новокузнецкий металлургический комбинат (сейчас входит в состав ЕВРАЗ ЗСМК) поставил в адрес ГУП «Московский метрополитен» первую партию дифференцированно-термоупрочненных рельсов Р65 длиной 100 метров. Произведенные ЕВРАЗ ЗСМК рельсы будут использоваться на участке Арбатско-Покровской линии между станциями «Киевская» и «Славянский бульвар». В январе впервые в истории 100-метровые рельсы были уложены в метро.

Ранее работники метрополитена сваривали 25-метровые рельсы в 125-метровые плети, которые укладывались в путь. Применение 100-метровых рельсов позволит упростить технологию, отказавшись от сваривания рельсов в плети, что повысит безопасность, обеспечит плавность и бесшумность движения электропоездов, комфорт для пассажиров.

Новокузнецкий металлургический комбинат сотрудничает с метрополитеном с момента его основания. С 2002 года ЕВРАЗ ЗСМК (Западно-Сибирский металлургический комбинат) является главным поставщиком рельсов для метрополитена Москвы, единственным производителем рельсов для метрополитенов Санкт-Петербурга, Казани, Новосибирска.

Все вышеперечисленные предприятия и цеха находятся в России, но используют оборудование иностранных фирм, причем доля этого оборудования на сегодняшний день составляет примерно 90%. Тенденция к увеличению импорта оборудования в металлургической промышленности имеет место, это связано с зависимостью российских металлургических компаний от западных кредитов, зачастую кредиты предоставляются оборудованием. Отсутствие отлаженных финансовых механизмов (лизинг, проектное финансирование) внутри страны становится серьезным препятствием на пути сбыта продукции.

«За иностранными поставщиками нередко стоит государство. Многие контракты на приобретение европейского оборудования заключались по той простой причине, что под эти сделки предоставлялись связанные льготные кредиты, выделяемые государственными агентствами по стимулированию экспорта. В то же время российские компании, как правило, не могут предоставить дешевого финансирования покупок своей продукции. Это, безусловно, серьезное упущение нашего государства, которому, в большинстве случаев совершенно безразличны нужды нефинансового и несырьевого секторов отечественной экономики»[9].

В последние годы российские металлурги добились определенных успехов в снижении доли импорта на отечественном рынке стали. Было освоено производство ряда видов стальной продукции, ранее ввозимой из-за рубежа. Однако все успехи были достигнуты с использованием импортного оборудования. В связи с этим встает главный и очень актуальный в настоящий момент вопрос: что мешает отечественному металлургическому машиностроению заменить иностранных поставщиков?

Безусловно, в ряде случаев приобретение более эффективного, передового и качественного оборудования за границей просто необходимо. Это обусловлено тем, что, к сожалению, наши машиностроители сейчас не все умеют производить. Некоторые предприятия самостоятельно ведут инновационную деятельность, которая почти никак не поддерживается государством. И они вынуждены конкурировать с иностранными компаниями, имеющими большой опыт в конструировании и лучшие кадры со всего мира.

Рассмотрим ведущие предприятия и институты в области металлургического машиностроения в России.

ОАО «Уралмашзавод» (Уральский машиностроительный завод) - один из лидеров российского рынка оборудования для металлургии, горнодобывающей, нефте- и газодобывающей промышленности, промышленности строительных материалов и энергетики. Стратегия развития компании предусматривает создание машиностроительного предприятия мирового уровня, которая сможет комплексно обеспечивать потребности заказчиков в оборудовании. Наиболее значимые достижения в разработках оборудования, способствовавшие научно-техническому прогрессу в металлургии:

- создание рельсобалочных станов;
- создание высокопроизводительных блюмингов-автоматов;
- создание станов для горячей и холодной прокатки труб;
- создание оборудования для производства железнодорожных колес;
- создание совместно с технологическими институтами технологии и оборудования для закалки рельсов в масле;
- создание принципиально новых машин непрерывного литья заготовок криволинейного типа;
- создание уникального универсально-балочного стана;
- создание уникальных кольцепрокатных станов;
- слябовые МНЛЗ.

Всероссийский научно исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения (ВНИИМЕТМАШ) – организация, которая уже более 65 лет успешно работает в области металлургии. Одним из важнейших направлений деятельности ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» является экспорт оборудования и инжиниринга в страны дальнего и ближнего зарубежья. За последние десять лет география экспортных поставок так же достаточно широка и охватывает такие страны как США, Япония, Республика Корея, Франция, КНР, Индия, Румыния, Украина, Армения, Казахстан, Азербайджан, Узбекистан и другие страны.

Устойчивым спросом за рубежом пользуются такие виды оборудования, как:

- станы холодной прокатки прецизионных труб;
- деталепрокатные станы;
- изостатические прессы;
- гильзовые кристаллизаторы высокоскоростных сортовых МНЛЗ.

Машиностроительный концерн «ОРМЕТО-ЮУМЗ» (Южно-Уральский машиностроительный завод) является одним из крупнейших предприятий тяжелого машиностроения России с численностью 4000 сотрудников. Производственный комплекс охватывает полный цикл производства и располагает металлургическим, сварочным и

механосборочным производствами. Специализация - уникальное высокотехнологическое, комплексное оборудование, изготавливаемое в соответствии с индивидуальными требованиями заказчиков. Оборудование с маркой ОРМЕТО-ЮУМЗ работает более чем в 30 странах мира.

Одна из основных специализаций завода – машины непрерывного литья заготовок, которые раньше назывались установки непрерывной разливки стали. Заводом поставлено более 80 комплектных машин различного типа.

ОАО «ЭЗТМ» (Электростальский завод тяжелого машиностроения) специализируется на выпуске оборудования для металлургических, трубных и сортопрокатных цехов, горнодобывающей, цементной промышленности.

На сегодняшний день основное направление деятельности предприятия – проектирование и изготовление современного высококачественного оборудования, предназначенного в первую очередь для реконструкции существующих цехов и агрегатов с целью резкого повышения их технико-экономических показателей за счет создания и внедрения новых машин, значительно улучшающих качество готовой продукции.

Прокатное оборудование:

- Агрегаты для производства стальных бесшовных горячекатаных труб
- Агрегаты для производства сварных труб большого диаметра;
- Непрерывные трубоэлектросварочные агрегаты для производства труб малого и среднего размера;
- Станы холодной прокатки труб;
- Средне и мелкосортные станы;
- Деталепрокатные станы;
- Малый трубопрокатный агрегат.

ОАО «КО ВНИИМЕТМАШ» (Колпинское отделение) является ведущим отечественным проектно-конструкторским предприятием в области разработки прокатных станов и прокатного оборудования для толстолистовых, обжимных, заготовочных, сортопрокатных станов и линий отделки проката, а также имеет возможности для проектирования большого спектра машиностроительной продукции.

ОАО «КО ВНИИМЕТМАШ» входит в сервисный сегмент дивизиона «Северсталь Российская Сталь» и обеспечивает инжинирингом металлургические и горнодобывающие комплексы ПАО «Северсталь» и других компаний России.

Наиболее крупные из осуществленных проектов ОАО «КО ВНИИМЕТМАШ»:

- Крупносортный стан 600 Коммунарскогометкомбината Украина;
- Сортной стан 350 Кировского завода, Санкт-Петербург;
- Среднесортной стан 550 меткомбината им. Петровского, Днепропетровск;
- Толстолистовой стан 5000 Ижорского завода, Санкт-Петербург(г. Колпино);
- Крупносортный стан 650 Исфahanскогометзавода, Иран;
- Обжимно-заготовочный стан 900/850/750 Румыния, Тырговиште;
- Блюминг 850, Азербайджан;
- Стан 450 Египет, Хелуан;
- Стан 650 Нижний Тагил;
- Среднесортной стан 700. Нигерия, Аджоакута.

ОАО «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ» (Сибирский завод электротермического оборудования) работает на рынке электротермического оборудования с 1945 года и традиционно занимает лидирующие позиции на рынках России и стран СНГ. Продукция завода широко используется в сталелитейной, ферросплавной, машиностроительной и других отраслях. География поставок за период работы завода охватила более 32 стран мира. Более 98% всего объема ферросплавов на территории стран СНГ, производится на электропечах СИБЭЛЕКТРОТЕРМ. Один из

крупнейших ферросплавных комбинатов мира ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат» укомплектован рудовосстановительными печами данного предприятия.



Рис. 3. Толстолистовой «Стан-5000» Ижорского завода

Все вышеперечисленные предприятия и заводы готовы проектировать и изготавливать традиционное оборудование для металлургического машиностроения, однако выход на новый, более высокий, уровень возможен при разработке новых крупномасштабных проектов, которые в настоящее время не реализованы в России:

- 1) ЛПА с двухвалковым кристаллизатором, совмещенный со станом холодной прокатки;
- 2) Толстослябовая МНЛЗ, применимая к Стану 5000 (г. Колпино).

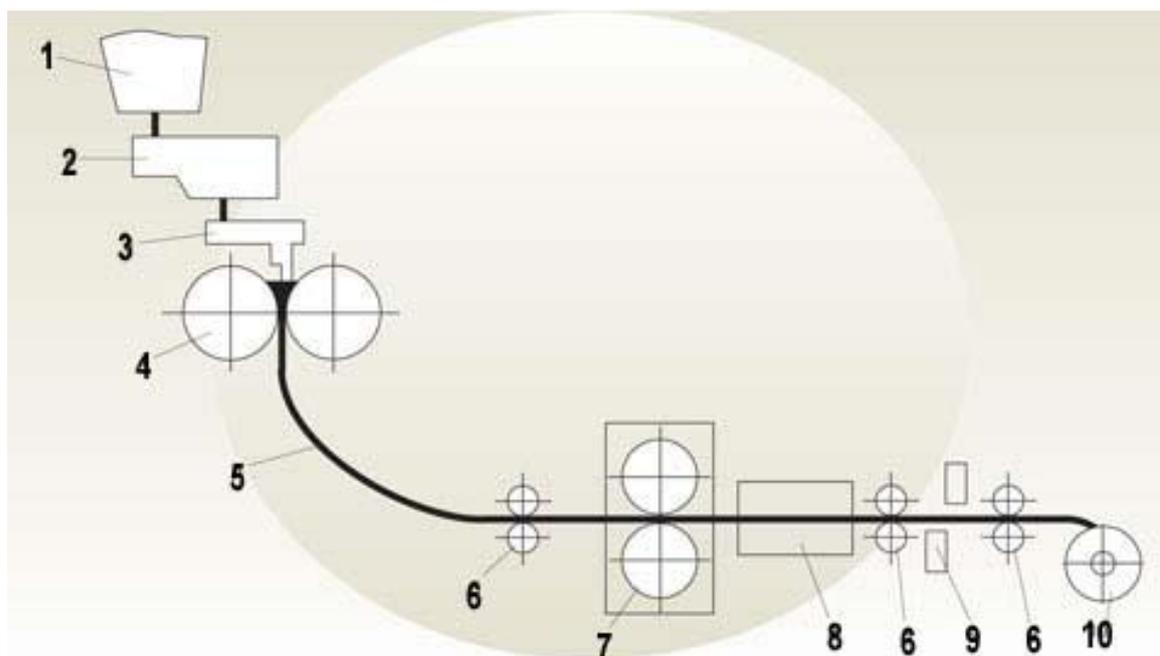


Рис. 4. Общая схема двухвалкового ЛПА для производства тонких полос

1) Общая схема валкового литейно-прокатного агрегата приведена на рисунке 1. Из ковша 1 жидкий металл заливают в промежуточный ковш 2, а из него через разливочное устройство 3 в валковый кристаллизатор 4. Полосу 5 после литейно-прокатного агрегата

подвергают дополнительному обжатию в валках прокатной клетки 7, а после прохождения участка охлаждения (термообработки) 8 полосу разрезают на листы ножницами 9 или сматывают в рулоны на моталке 10. В состав линии агрегата входят несколько тянущих клеток (валков) 6.

В обычных технологиях, когда после получения литых заготовок происходит их охлаждение, а затем (после транспортировки в прокатные цехи) прокатка, удельный расход энергии превышает 2000 МДж на тонну стального проката. Если же реализовать прокатку литых заготовок, не допуская их охлаждения ниже определенной температуры, то удельный расход энергии будет меньше в 6-7 раз. Этот факт доказывает, что совмещение агрегатов - отличный способ снижения энергозатрат.

2) Сегодня максимальная толщина непрерывно литого сляба в России, составляет 355 мм. Этот сляб получен на криволинейной МНЛЗ №8 Новолипецкого металлургического комбината, машина конструкции Siemens-VAI.

За рубежом есть машины, вертикальные и криволинейные, разливающие сляб толщиной 400 мм.

Мировой рекорд по толщине сляба был установлен в 2010 году после реконструкции вертикальной с изгибом в твердой фазе машины №5 завода Dillinger в Германии - сляб толщиной 450 мм. В настоящее время на этом заводе строится еще одна машина для разливки слябов толщиной более 450 мм.

В России нужна как минимум одна машина. Наиболее подходит стан 5000, установленный в ЛПЦ-3(г. Колпино), он имеет раствор валков до 800 мм.

Для реализации перечисленных задач необходимо объединение усилий отечественных предприятий и, безусловно, поддержка государства. Рассмотрев ведущие Российские предприятия и теперь зная их возможности, можно сделать вывод о том, что вышеуказанные проекты осуществимы и, с учетом сложившейся экономической ситуации, у отечественных машиностроителей может быть реальный шанс продемонстрировать свои возможности и возможности своих изделий.

Литература

1. http://newsruss.ru/doc/index.php/Металлургическое_машиностроение_России
2. <http://www.protown.ru/information/hidden/4486.html>
3. *Официальный сайт ОМК* <http://оао-омк-сталь.рф/>
4. https://ru.wikipedia.org/wiki/Высота_239
5. http://www.chelpipe.com/about/investment_projects/steel_smelting_complex/
6. *Официальный сайт* <http://kaluga.nlmk.com/>
7. http://radiovesti.ru/article/show/article_id/99037
8. <http://www.rg.ru/2013/07/31/reg-sibfo/relsy.html>
9. *Тарнавский В.* Проблемы импортозамещения в металлургическом машиностроении. //Журнал «Металлоснабжение и сбыт», 2015г., №3, 82с.
10. *Официальный сайт ОАО «Уралмашзавод»* <http://www.uralmash.ru/>
11. *Официальный сайт ВНИИМЕТМАШ имени академика А.И.Целикова* <http://www.vniimetmash.ru/>
12. *Официальный сайт ОАО «ОРМЕТО-ЮУМЗ»* <http://www.ormeto-yumz.ru/>
13. *Официальный сайт ОАО «ЭЗТМ»* <http://www.eztm.ru/>
14. *Официальный сайт ОАО «КО ВНИИМЕТМАШ»* <http://metmash.severstal.com/rus/>
15. *Официальный сайт ОАО «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ»* <http://www.sibelectrotherm.ru/>

УДК 621.771

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СВЕРХТОНКОЙ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ПОЛОСЫ

Юрий Михайлович Куренков

Студент 4 курса

кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.В. Мунтин

кандидат технических наук, главный специалист по рулонному прокату ОАО "ВМЗ"

Введение

Развитие авиации, автомобилестроения, приборостроения, энергетического машиностроения, повышение эффективности линий по штамповке изделий из рулонной листовой стали, в том числе, с глубокой вытяжкой, а также рост выпуска кровельных материалов и необходимость улучшения качества товаров народного потребления (легковых автомобилей, холодильников, стиральных машин и др.) требует производства планшетных полос, лент, листов и фольги. Наиболее актуальна проблема получения планшетных (ровной формы) полос при горячей прокатке на широкополосных станах. Качество листа во многом зависит от правильной, а точнее, от научно-обоснованной настройки стана. Несмотря на успехи ученых и производственников в области улучшения плоскостности прокатываемых полос, более жесткие требования новых стандартов и заказчиков к качеству проката вызывают необходимость в разработке и реализации эффективных технологий и технических средств, позволяющих производить планшетный металл.

В настоящее время самым крупным рынком для такой полосы являются сварные трубы и строительные металлоконструкции. Горячекатаная полоса используется как основа для нанесения покрытий, а также в качестве исходного материала для холодной прокатки. Новые технологии горячей прокатки и оборудование дают возможность достигать качества поверхности, стабильности толщины и формы профиля, которые позволяют этой продукции конкурировать с холоднокатаной полосой в ряде отраслей. Решающим фактором является конкурентоспособность в части себестоимости такой продукции. Так как нет дополнительного передела, т.е. холодной прокатки, себестоимость конечной продукции снижается, но вместе с тем важно обеспечить стабильный процесс прокатки и качество тонкой горячекатаной полосы. При этом прогнозируется, что в Европе до 27% холоднокатаной полосы на рынке может быть заменено на ультра тонкую горячекатаную полосу толщиной менее 1,2 мм. Фирма Danieli ожидает, что эта доля может достигнуть 35% при снижении цены на \$20-30 за тонну.

Однако при горячей прокатке полосы высокое качество, как правило, гарантируется при толщине полосы не менее 1,5 мм. При попытке получить более тонкую полосу возникают проблемы с качеством поверхности, планшетностью, соблюдением скоростных и температурных параметров производства, стабильностью процесса прокатки. К тому же, при скоростях прокатки более 15 м/с у полос толщиной порядка 1 мм при транспортировке по отводящему рольгангу к моталке происходит нерегулируемый подъем (планирование) переднего конца. Таким образом, совершенствование технологии и оборудования, обеспечивающих производство качественной полосы толщиной менее 1,5 мм в условиях широкополосных станов горячей прокатки, является актуальной задачей.

Горячую прокатку полос осуществляют на непрерывных и полунепрерывных станах. На сегодняшний день традиционными считаются станы для прокатки полосы из сляба толщиной до 300 мм с повторным нагревом в методических печах или печах с шагающими балками.

Например, на Магнитогорском металлургическом заводе полосу толщиной 1,2 – 16 мм прокатывают из сляба толщиной 230 - 300 мм. При этом выплавка стали и разливка слэбов может осуществляться в отдельном цеху или даже на другом заводе.

По данным фирмы Siemens VAI, для производства полосы UTHS (Ultra Thin Hot Rolled Strip – сверхтонкая горячекатаная полоса) наиболее рационально использовать тонкослябовую заготовку толщиной 70-150 мм. Наиболее значимым событием последних десятилетий в черной металлургии явилось создание технологии производства горячекатаной стальной полосы на основе тонкослябовой отливки, которая подразумевает прямую прокатку горячего сляба после МНЛЗ. Этот процесс получил название «Компактное производство полосы» — процесс CSP (Compact Strip Production). Преимущества данного процесса очевидны, а по сравнению с традиционным способом производства рулонного проката проката CSP с тонкослябовой машиной непрерывного литья обеспечивает:

1. Снижение удельных капитальных затрат на 30 - 40%;
2. Снижение себестоимости проката на 20 - 25%;
3. Снижение энергетических и материальных ресурсов на 50 - 60%;
4. Улучшение экологических условий;
5. Сокращение времени выполнения заказов.

Рассмотрим подробнее особенности станов по производству горячекатаной полосы.

Традиционные непрерывные широкополосные станы горячей прокатки

Непрерывный широкополосный стан 2000 является традиционным для горячей прокатки полос, который позволяет получать листовой и рулонный прокат толщиной 1,5-16,0 мм и шириной 750-1950 мм из литых слэбов толщиной до 300 мм. В России функционирует три стана 2000: ЧерМК (Череповецкий Металлургический Комбинат), ММК (Магнитогорский Металлургический Комбинат), НЛМК (Новолипецкий Металлургический комбинат). Типовая схема НШПС 2000 представлена на рис. 1.

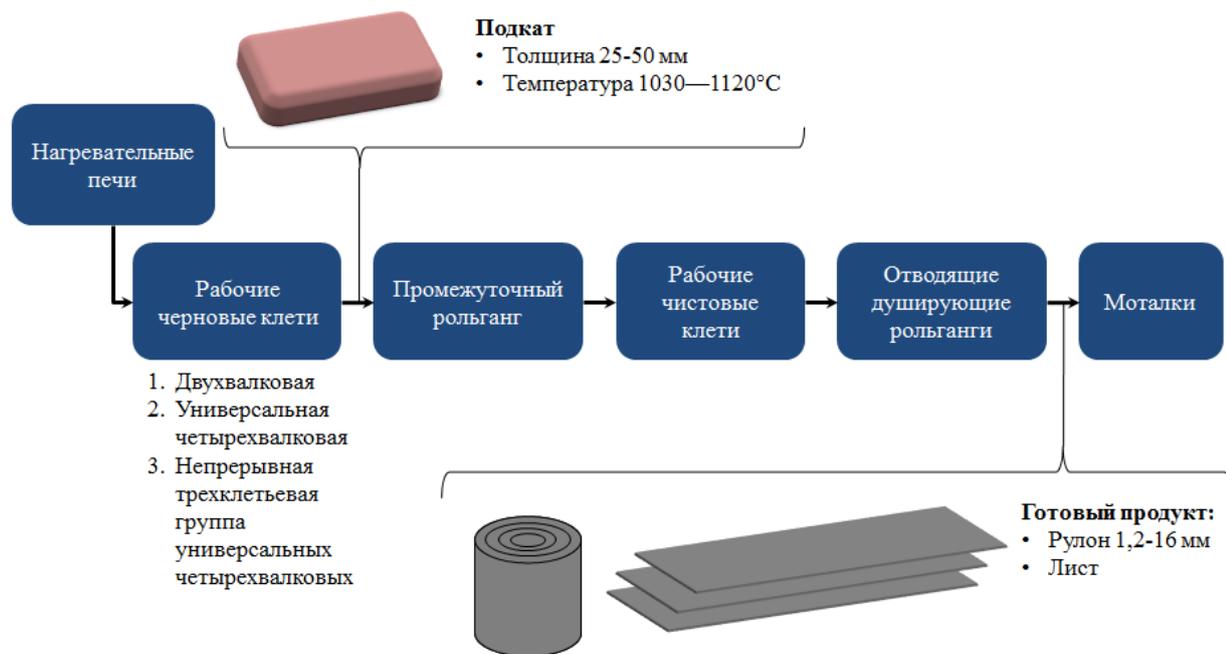


Рис. 1. Общая схема НШПС 2000

При производстве слябы нагреваются в печи до 1200-1250°C, далее по рольгангу транспортируются в черновую группу стана. После прокатки в первых двух черновых клетях раскат поступает в непрерывную трехклетевую группу до толщины 25-50 мм. После прокатки в черновой группе клеток подкат по промежуточному рольгангу поступает в чистовую групп.

Перед чистой группой установлены летучие ножницы для обрезки переднего и заднего концов подката, что уменьшает динамические нагрузки при захвате и стабилизации процесса прокатки. После обрезки переднего конца раскат направляют в чистой окалиноломатель. Далее металл прокатывают в чистой группе до конечной толщины. Окончательную геометрию полосы измеряют бесконтактными измерителями, расположенными за последней клетью стана. После выхода полосы из непрерывной чистой группы ее транспортируют по отводящему рольгангу к моталкам. На отводящем рольганге расположена система охлаждения, которая снижает температуру полосы на 200—250°C. На моталке полосу сматывают в рулон.

Распространение получили также комбинированные полунепрерывные станы, такие как ПНШПС 2800/1700 Череповецкого металлургического комбината или стан 2300/1700 Челябинского металлургического завода, у которых черновая группа фактически представляет собой толстолистовой стан, а чистовая — аналогична чистой группе НШПС. Металл, прокатанный в черновой группе, может быть направлен в чистовую группу для дальнейшей прокатки на меньшую толщину или отправлен на отделку и термическую обработку. На промежуточном рольганге этих станов размещают роликовые правильные машины и оборудование для поддержания температуры раската (например, проходные печи, как на стане 2300/1700 ЧМЗ).

При освоении производства особо тонкого горячекатаного проката в чистой группе клеток полунепрерывного комбинированного стана 2800/1700 ЧерМК» существует ряд проблем, связанных с ростом затрат энергии на процесс прокатки, ухудшением качества поверхности готового проката и снижением стойкости рабочих валков последних клеток. Устранение этих негативных явлений осуществляют путем усовершенствования режимов обжатий, межклетевых натяжений, а также температурного режима прокатываемых полос. Для оптимизации прокатки тонкой полосы предложены следующие изменения:

1. Уменьшение частных обжатий в 4^й, 5^й и 6^й клетях на 10–30% относительно значений, а следовательно снижение в них максимальных контактных напряжений на 20–60%;
2. Увеличение температуры подката до 1080°C;
3. Увеличение удельного межклетевого натяжения до 10–15% от величины сопротивления деформации, что, за счет повышения устойчивости движения полосы, способствует лучшему ее удержанию на оси прокатки и оказывает дополнительное влияние на уменьшение разноширинности полос.

CSP-компактное производство полосы

CSP (Compact Strip Process или литейно-прокатные комплексы) – технологическая линия, разработанная компанией SMS-Demag (Германия), для производства тонкого слябов толщиной 50-100 мм и его последующей прокатки в тонкую полосу. Низкие удельные капиталовложения, короткий строительный цикл, простая и компактная технология, специализированный сортамент продукции, ориентированный на конкретного потребителя - весь этот комплекс объективных предпосылок сделал литейно-прокатные комплексы CSP одним из наиболее динамично развивающихся и эффективных направлений в черной металлургии. Первые шаги в направлении горячей прокатки особо тонкой полосы по технологии CSP были предприняты компанией Ternium Hylsa (Мексика) в 1995г. Практика показала, что для прокатки готовой тонкой полосы необходимо модернизировать системы автоматизации. Компании удалось прокатать готовую полосу минимальной толщиной 0,91 мм благодаря:

1. Пересмотру режима обжатий;
2. Созданию быстродействующей системы контроля и регулирования полосы;
3. Установка систем подачи смазки в межвалковый зазор (для уменьшения давления металла на валки и снижения их износа).

Проектированием и строительством литейно-прокатных комплексов (ЛПК) также занимаются компании Siemens VAI и Danieli. В 2008 году в г. Выкса Нижегородской области запущен ЛПК «ОМК-Сталь» (производитель оборудования – Danieli) (рис. 2).

Процесс производства начинается с загрузки металлолома в дуговую сталеплавильную печь. Далее следует этап выплавки, после которого готовый расплав подается в МНЛЗ. Продуктом на этой стадии производства является стальная заготовка – тонкий сляб, производство которого обеспечивается за счет воронкообразного кристаллизатора. Толщина на выходе из кристаллизатора – 110 мм, толщина готового сляба – 90 мм. Технологический процесс включает в себя обжатие слитка с жидкой сердцевиной и позволяет изменять ширину сляба в процессе разлива. После разлива непрерывный сляб делится на мерные длины на ножницах перед туннельной печью. В туннельной печи роликового типа происходит нагрев и выравнивание температуры перед прокаткой.

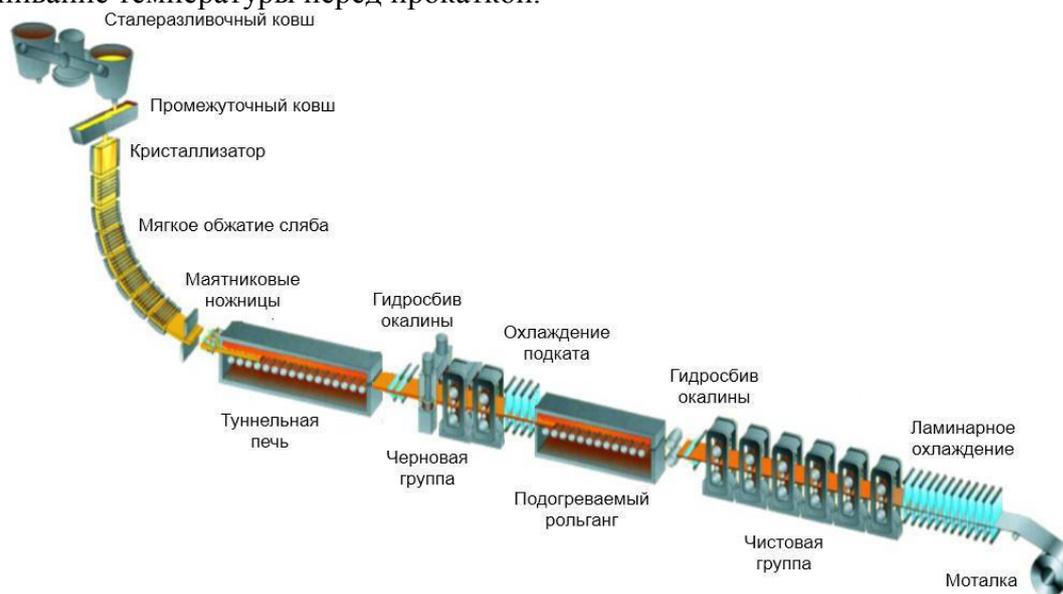


Рис. 2. Схема ЛПК «ОМК Сталь»

Далее слябы прокатывают в 2-ух черновых и 6-ти чистовых клетях непрерывного широкополосного стана 1950, между которыми располагается участок интенсивного охлаждения раската и подогреваемый рольганг длиной 100 м., где проводится выравнивание температур раската и обеспечивается сохранение тепловой энергии. Черновая группа клетей оснащена вертикальными валками, предназначенных для обжатия кромок раската с целью получения заданной ширины. Перед прокаткой в чистовой группе клетей проводится удаление с поверхности раската окалины и обрезка концов полосы. Дальнейшее формирование геометрии и механических свойств происходит в чистовой группе клетей и при охлаждении полосы на отводящем рольганге в установке ламинарного охлаждения. Затем полоса сматывается в рулон на моталке подпольного типа.

При производстве рулонного проката на ЛПК «ОМК-Сталь» удалось добиться минимальной толщины 1,0 мм при ширине 1200 мм. При этом отмечены стабильные геометрические параметры и механические свойства стали, соответствующие всем техническим требованиям.

Полубесконечная полоса

Критическим моментом при производстве тонких полос продолжает оставаться заправка переднего конца полосы в стан чистовой прокатки и выход заднего конца. Компания SMS-Siemag разработала полубесконечный процесс прокатки, который реализован на заводах Masteel (Малайзия) и Lysteel (Китай). По данной схеме прокатки длинный тонкий сляб длиной 270 м и более разливают и прокатывают за одну операцию. Прокатку такого сляба вначале ведут до некритической толщины полосы, что позволяет обеспечить стабильный захват при

прокатке и смотке полосы. В ходе прокатки межвалковые зазоры уменьшают до величины, необходимой для получения требуемой толщины. Отличия в конфигурации этих агрегатов по сравнению с CSP заключаются в высокоскоростных ножницах, установленных непосредственно перед моталками и обеспечивающих порезку полосы на скорости до 18-20 м/с, а также в узле направляющих роликов с переключателем, позволяющим быстро перенаправлять полосы с одной подпольной моталки на другую. Используя принцип полубесконечной прокатки, компания Lysteel освоила производство полосы толщиной 0,77 мм.

ESP-производство бесконечной полосы

Цех ESP (endless strip production) бесконечной прокатки полосы, завода Arvedi (Италия), спроектирован и построен фирмой Siemens VAI. Применяемая технология позволяет получать тонкую горячекатаную полосу высокого качества при меньших затратах, чем описанные выше технологические процессы. Благодаря бесконечному характеру процесса (полоса достигает длины 150 км) исключается необходимость в периодически повторяющейся операции по задаче переднего конца заготовки в клети прокатного стана. На этом основана возможность производства сверхтонких полос в линиях ESP. Прокатка полосы происходит при постоянном натяжении, что исключает опасность искажения ее формы, в том числе в условиях нестабильного процесса прокатки концов заготовок. Достигается низкий расходный коэффициент металла, так как отсутствует обрезь от переднего и заднего концов заготовок. Резку полосы производят только перед ее поступлением к подпольным моталкам.

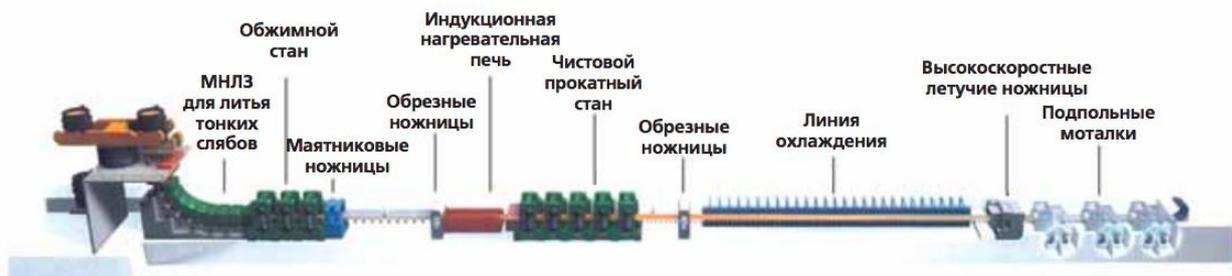


Рис. 3. Схема технологического процесса линии Arvedi

Литейно-прокатный агрегат (рис.3) имеет длину 190 м, что составляет менее половины длины типового широкополосного стана горячей прокатки, без учета МНЛЗ и промежуточных складов. Номинальная производственная мощность нового агрегата превышает 2 млн. т/год горячекатаной полосы в рулонах. Ширина прокатанной полосы достигает 1600 мм, толщина — от 0,8 мм и более.

Три клети чистой группы прокатного стана оборудованы профилированными вальками, что обеспечивает высокий уровень плоскостности прокатанной полосы. Все клети стана оборудованы системами автоматического регулирования толщины полосы и другими контрольными системами. После выхода из последней клети стана полосу охлаждают с помощью системы ламинарного охлаждения, благодаря чему получают требуемые механические свойства металла. Затем полоса проходит через высокоскоростные ножницы и сматывается в рулон на одной из трех подпольных моталок. Наилучшим результатом в производстве сверхтонкой полосы на агрегате ESP является прокатка полосы толщиной 0,8 мм и шириной 1500 мм.

Возникновение дефектов формы при производстве тонких полос

Неудовлетворительная планшетность горячекатаных полос толщиной менее 2 мм вызывает повышенную отбраковку и доработку рулонного проката, что повышает себестоимость его производства. Также образование дефекта планшетности приводит к нарушению стационарного процесса прокатки, обрывам прокатываемых полос, наварам рабочих валков, порезу полос.

Наиболее распространённым дефектом планшетности в практике прокатного производства является волнистость, когда прокатываемая полоса на её отдельных участках изгибается в продольном и поперечном направлении, причём радиус изгиба изменяется как по длине, так и по ширине полосы. Как правило различают следующие варианты волнистости: краевая волнистость, центральная волнистость и местная волнистость (рис.4). Волнистость может быть как симметричной, так и не симметричной по ширине полосы, стабильно и не стабильной по её длине. Для случаев образования волнистости характерна разность длины соседних участков в направлении ширины полосы. Так, при центральной волнистости участки, расположенные по центру полосы, оказываются длиннее участков полосы, расположенных по её краям, при местной волнистости участки полосы, расположенные в месте дефекта, обычно длиннее, чем её планшетной части.

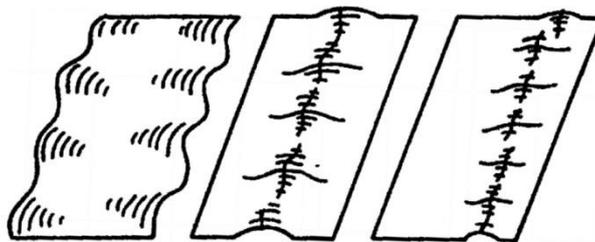


Рис. 4. Варианты волнистости (слева направо): краевая, центральная, местная

Образование волнистости при прокатке в межклетевом пространстве может также послужить причиной образования дефекта «порез», когда складка металла закатывается в валках следующей клетки (рис.5). Кроме этого неудовлетворительная планшетность, особенно на головном участке полосы, обуславливает нестабильный процесс прокатки и может стать причиной обрыва полосы и соответствующего аварийной остановки стана.

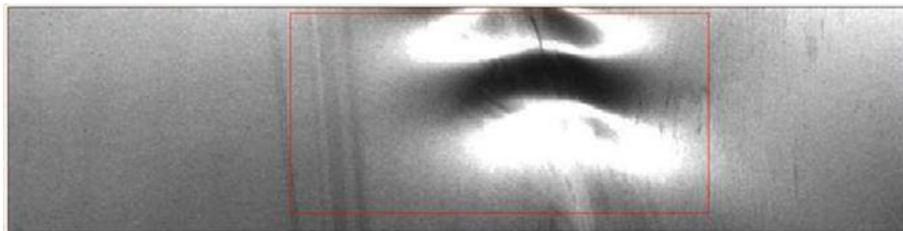


Рис. 5. Дефект «порез»

К настоящему времени определены и изучены факторы, приводящие к нарушению планшетности прокатанных полос. Это поперечная разнотолщинность подката, неравномерность обжатий по ширине очага деформации, вызванная упругим изгибом валковой системы, тепловой выпуклостью и сплющиванием валковой системы, износом рабочих валков. При прокатке обычно происходит одновременное изменение поперечного профиля и планшетности прокатанных полос. По причине упругого изгиба валковой системы, износа или тепловой выпуклости валков изменяется профиль зазора между рабочими валками, что создаёт различное обжатие участков прокатанных полос по её ширине. В более обжимаемых участках полосы в результате сдерживающего воздействия менее обжимаемых участков появляются продольные сжимающие напряжения. В менее обжимаемых участках полосы в результате воздействия обжимаемых её участков появляются продольные растягивающие напряжения. Таким образом, участки прокатанных полос, получившие большую вытяжку, будут упруго растягиваются, а участки, получившие большую вытяжку, будут упруго сжиматься в продольном направлении. Неравномерность напряжений сохранится и в прокатанных полосах в виде продольных остаточных напряжений.

Качество планшетности прокатываемых полос зависит от возможности регулирования параметров прокатки. Классические методы регулирования планшетности: профилирование

прокатных валков, регулирование теплового профиля валков, гидравлический изгиб рабочих и опорных валков в чистовых клетях, а также регулирование частных обжатий. Перечисленные методы обладают известными недостатками. Например, профилировка валков, как правило, оптимальна для прокатки определённого типоразмера полос, тепловое регулирование валков имеет значительную инерционность. Применение противоизгиба рабочих валков приводит к дополнительному нагружению подшипников валкового узла и более интенсивному износу бочек валков.

Важным преимуществом гидравлического изгиба валков перед другими способами является его быстродействие, позволяющее регулировать поперечный профиль полосы непосредственно при прокатке, а также возможность на одних и тех же валках прокатывать полосы разной ширины, разного профилеразмера, с различными режимами обжатий. Для регулирования планшетности прокатываемых полос применяют противоизгиб рабочих валков, и дополнительный изгиб опорных валков (рис.6).

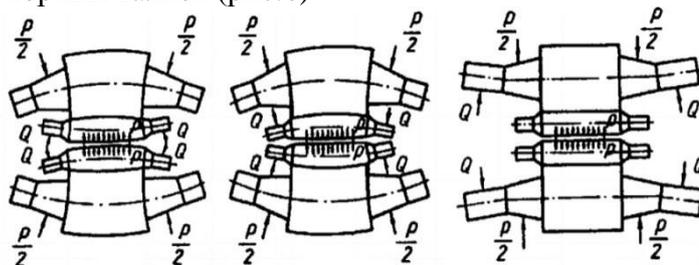


Рис. 6. (слева направо) Противоизгиб рабочих, дополнительный изгиб рабочих валков, противоизгиб опорных валков

При этом неправильное использование изгибов может принести отрицательный эффект. Поэтому при разработке технологии и производстве проката необходимо обеспечить точный расчёт энергосиловых параметров процесса прокатки, в частности силы прокатки, которая в значительной степени определяет требуемый изгиб валков.

Заключение

Таким образом, современное оборудование и технологии позволяют получать качественную горячекатаную полосу минимальной толщиной 0,77 мм. Такая полоса может конкурировать с холоднокатаной в определённом марочном и размерном сортаменте, выигрывая у неё по себестоимости. Однако существует ряд технологических трудностей, в первую очередь связанных с обеспечением планшетности полосы и стабильности процесса прокатки. С точки зрения совершенствования оборудования пройден путь от традиционных непрерывных и полунепрерывных широкополосных прокатных станков до литейно-прокатных комплексов по прокатке бесконечной полосы. С точки зрения технологии необходимо осуществлять научно-обоснованный выбор частных обжатий при прокатке, температурных режимов, изгибов и профилировки валков.

Литература

1. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке // Издательство «Теплотехник». 2008. С 5-13.
2. <http://www.metalspace.ru/>
3. <http://www.siemens-vai.com/>
4. <http://tekhnosfera.com/>
5. <http://www.imet.ac.ru/linkpics/News/tarasov.pdf>
6. Кожевникова И.А, Автореферат «Разработка, теоретическое обоснование, исследование и внедрение эффективных технологий прокатки особо тонких полос». 2012

7. Степанов А. П., Миронова М. О. Анализ энергосиловых параметров процесса прокатки толстых листов на стане 5000. «Студенческая весна 2014: Машиностроительные технологии». – М.: МГТУ им. Н.Э Баумана.

УДК 669.019.02/09

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАЛА ШПИНДЕЛЯ СТАНА ДУО-КВАРТО 320 ХП

Алексей Олегович Соколов

Студент 6 курса

кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.А. Мальцев

кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»

Технологическое оборудование прокатного стана дуо-кварто 320 ХП включает в себя рабочую клетку дуо-кварто вместе с ее электроприводом (основное оборудование) и вспомогательное оборудование — рольганг, правую и левую моталки консольного типа со своими электроприводами, ножницы продольной и поперечной резки, сварочный аппарат, правильную машину [1].

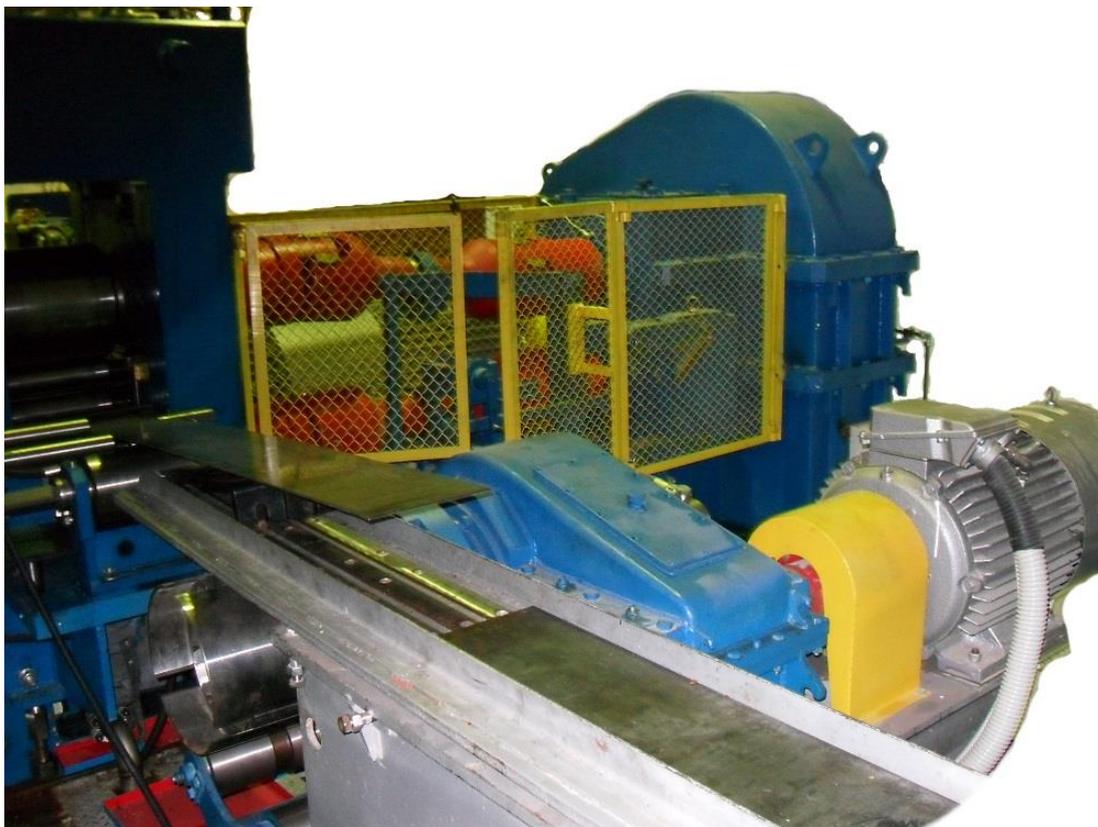
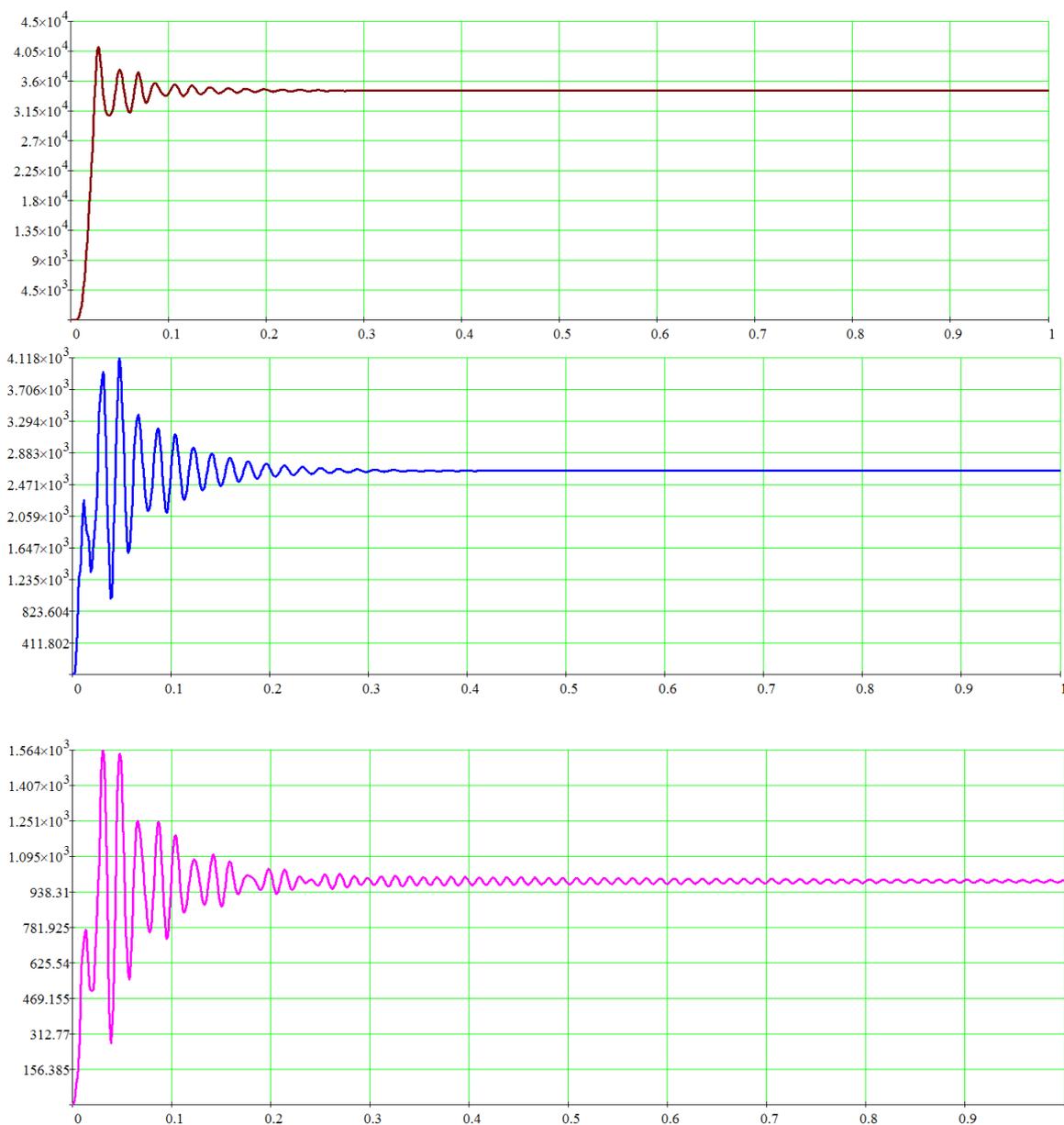


Рис. 1. Стан дуо-кварто 320 ХП

В состав электропривода клетки дуо-кварто (главного электропривода) входят два универсальных шпинделя — верхний и нижний. Результаты математического моделирования

(MathCAD-графики) показали, что валы этих шпинделей испытывают циклические нагрузки в процессе прокатки заготовок из высоколегированных прецизионных сплавов. Крутильные колебания возникают в электроприводах многих прокатных станов [2]. То есть в процессе проведения экспериментов по прокатке сутунок на стане дуо-кварто 320 ХП, осуществляемой с большими обжатиями, после ударного захвата заготовки рабочими валками, на участках валопровода возникают высокоамплитудные крутильные колебания (рис.2).



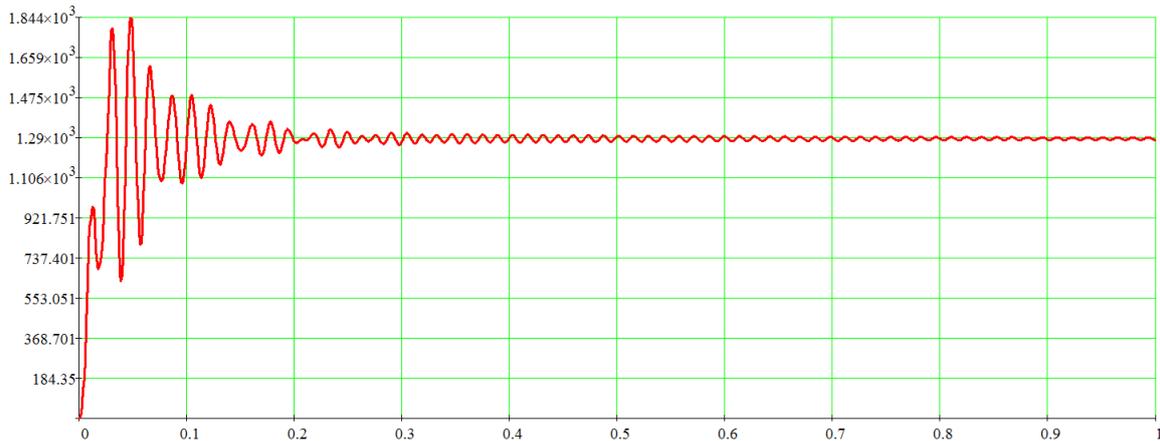


Рис. 2. MathCAD-графики моментов сил упругости M_1, M_2, M_3, M_4 на четырех участках валопровода прокатного стана дуо-кварто 320 XII

Появляется опасность накопления усталостных повреждений в материале той или иной детали валопровода, например, в металле универсального шпинделя стана дуо-кварто 320, что рано или поздно приведет к усталостному разрушению вала, скорее всего, в его опасном сечении. Универсальный шпиндель имеет вал DE и два шарнира AD и EH ; шарнир AD состоит из головки с лопастью AB вилки CD ; шарнир EH состоит из вилки EF и головки с лопастью GH (рис. 3).

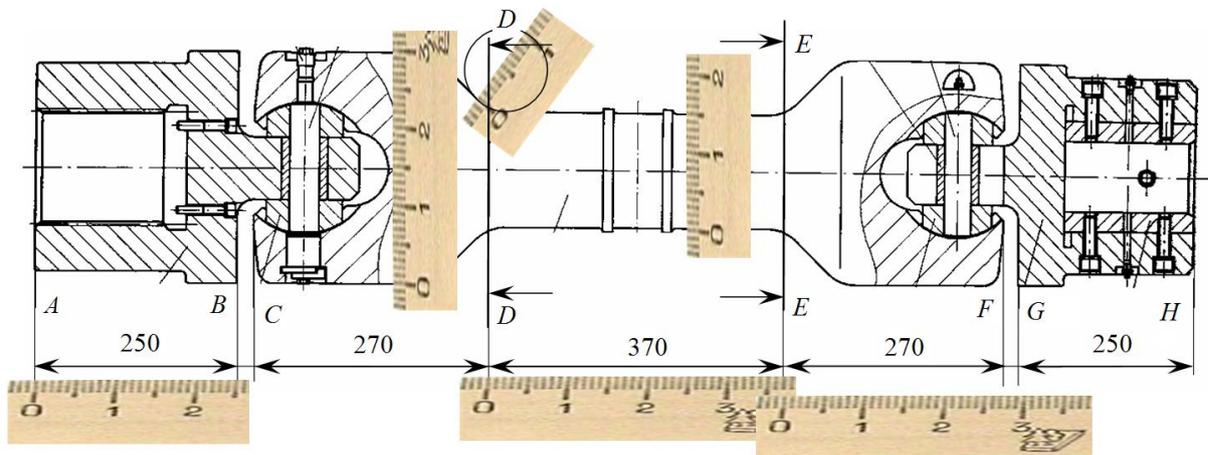


Рис. 3. Универсальный шпиндель

Наибольшие касательные напряжения при кручении шпинделя возникают в его опасном сечении $D-D$ (или $E-E$) — месте перехода по галтели от вилки к валу. Диаметр вилки $D_{\text{вилки}} = 300$ мм, диаметр вала $d_{\text{вала}} = 150$ мм, радиус галтели $\rho_{\text{галтели}} = 50$ мм, что превышает $0,3$ мм, следовательно, для расчета предела выносливости $\tau_{-1\text{вала}}$ применимы все уравнения теории подобия усталостного разрушения.

ГОСТ 25.504-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости» устанавливает порядок расчета предела выносливости шпинделя $\tau_{-1\text{вала}}$ в его опасном сечении согласно статистической теории подобия усталостного разрушения, описывающей совместное влияние различных факторов на характеристики сопротивления усталости деталей машин. Эта теория вытекает из теории прочности «наиболее слабого звена» Вейбулла, учитывающей влияние геометрических размеров образцов и неоднородности распределения напряжений на характеристики сопротивления хрупкому разрушению.

Сначала, исходя из соотношения и $\rho_{r.шпн}/d_{шпн} = 50/150 = 0,33$ по верхней номограмме, соответствующей соотношению диаметров $D_{шпн}/d_{шпн} = 300/150 = 2$ (рис. 4) был графически определен теоретический коэффициент концентрации касательных напряжений в опасном сечении: $\alpha_\tau \approx 1,15$. Этот коэффициент равен отношению максимального напряжения в области концентратора к номинальному напряжению, вычисленному при отсутствии концентратора.

Затем был вычислен относительный градиент первого касательного напряжения \bar{G} , характеризующий скорость убывания напряжений по мере удаления от места их концентрации в сечении $D - D$ вала шпинделя:

$$\bar{G} = \frac{1,15}{\rho_{r.шпн}} + \frac{2}{d_{шпн}} = \frac{1,15}{50} + \frac{2}{150} = 0,036 \frac{1}{\text{мм}}.$$

Чем выше данный градиент, тем в меньшем объеме концентрируются высокие напряжения, тем меньше зерен металла приходится на этот объем и вероятность образования здесь усталостной трещины.

Влиянием второго и третьего компонента касательных напряжений, действующих в зоне концентрации, пренебрегают.

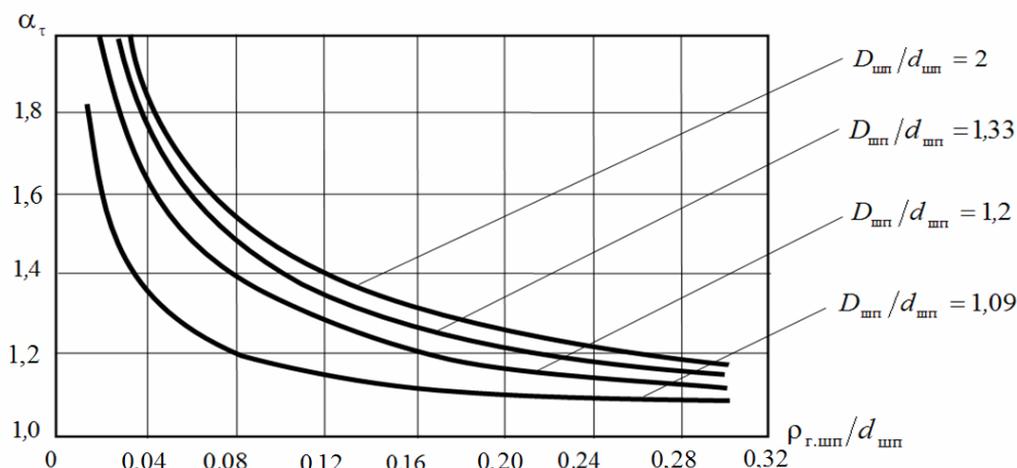


Рис. 4. Номограммы для графического определения теоретического коэффициента концентрации напряжений в опасном сечении вала шпинделя

Критерий подобия усталостного разрушения L/\bar{G} для вала шпинделя в его опасном сечении $D - D$:

$$\left(\frac{L}{\bar{G}}\right)_{шпн} = \frac{\pi d_{шпн}}{\bar{G}} = \frac{3,14 \cdot 150}{0,036} \approx 13083 \text{ [мм}^2\text{]},$$

где L — периметр рабочего сечения $D - D$ вала шпинделя; $L = \pi d_{шпн} = 471 \text{ мм}$.

Критерий подобия усталостного разрушения L/\bar{G} для гладкого лабораторного образца:

$$\left(\frac{L}{\bar{G}}\right)_{гл} = \pi d_{гл}^2 / 2 = 88,3 \text{ [мм}^2\text{]},$$

где $d_{гл} = 7,5 \text{ мм}$ — диаметр стандартного гладкого лабораторного образца (сталь 45), испытанного при изгибе с вращением.

Суть статистической теории подобия усталостного разрушения заключается в том, что чем ближе друг к другу значения $(L/\bar{G})_{шпн}$ и $(L/\bar{G})_{гл}$, тем больше совпадают функции распределения пределов выносливости $\tau_{-1шпн}$ и τ_{-1} , где τ_{-1} — предел выносливости стали 45 при кручении; $\tau_{-1} = 140 \text{ МПа}$. Относительный критерий подобия усталостного разрушения

$$\Theta = \frac{(L/\bar{G})_{\text{шп}}}{(L/\bar{G})_{\text{гл}}} = \frac{13083}{88,3} \approx 148$$

Далее найдено отношение эффективного коэффициента концентрации напряжений K_{τ} и масштабного коэффициента ε_{τ} :

$$\frac{K_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}} = \frac{2\alpha_{\tau}}{1 + \Theta^{-\nu_{\tau}}} = \frac{2 \cdot 1,15}{1 + 148^{-0,22}} = 1,73,$$

где ν_{τ} — коэффициент чувствительности стали 45 к концентрации напряжений и масштабному фактору; $\nu_{\tau} = 0,22$. После этого, согласно статистической теории подобия усталостного разрушения был определен предел выносливости

$$\tau_{-1\text{шп}} = \frac{\tau_{-1}}{\left[\frac{K_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}} + \frac{1}{\beta_m} - 1 \right] \frac{1}{\beta_y}} = \frac{140}{\left[1,73 + \frac{1}{0,88} - 1 \right] \frac{1}{1,2}} \approx 90 \text{ [МПа]},$$

β_m — коэффициент качества механической обработки поверхности шпинделя, $\beta_m = 0,88$; β_y — коэффициент упрочнения поверхности шпинделя, $\beta_y = 1,2$.

Для извлечения из анализируемого процесса (MathCAD-графиков) информации, необходимой для оценки уровня нагруженности, широко используют методы, основанные на замене реального случайного процесса нагружения некоторым схематизированным процессом, который по уровню накопленного в детали усталостного повреждения должен быть эквивалентен реальному процессу.

MathCAD-графики обработаны согласно ГОСТу 25.101-83 «Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов».

Нами была использована двухпараметрическая систематизация нагрузочного режима методом укрупненных размахов, где параметрами являются амплитудное напряжение цикла τ_{α} и среднее значение цикла τ_m , взятые из графиков нагружения. Метод укрупненных размахов предпочтительнее, чем просто метод размахов, приводящий к схематизированному процессу с меньшим повреждающим действием, чем реальный процесс.

Выполнены все этапы схематизации методом укрупненных размахов: «предварительная подготовка процесса нагружения к схематизации; дискретизация процесса нагружения; вычисление статистических характеристик последовательности ординат процесса нагружения; выделение экстремумов процесса нагружения; замена реального процесса нагружения схематизированным по выбранному методу схематизации; определение эмпирических распределений нагрузок схематизированного процесса и вычисление основных статистических характеристик распределений».

Выработка ресурса универсальным шпинделем прокатного стана дуо-кварто 320 ХП проявляется главным образом в накоплении необратимых повреждений механического (усталость, изнашивание, накопление пластических деформаций) и физико-химического происхождения (коррозия). Эти повреждения нужно описать в рамках теории, связывающей скорость накопления повреждений с действующими нагрузками в условиях окружающей среды.

Первые разработки по усталостной прочности материалов связаны с именем А. Веллера (середина XIX века), который построил первую машину для усталостных испытаний. Задача о долговечности деталей (по усталости) была поставлена в 1924 году Пальмгреном, который предложил гипотезу о линейном суммировании усталостных повреждений для ее решения. Гипотеза была основана на предположении, что повреждение, вызванное циклом напряжений, не зависит от состояния детали в данный момент и от последовательности приложения

амплитуд напряжений (истории нагружения) и просто суммируется с повреждениями, вызванными предыдущими циклами. Недостаток линейной гипотезы — значительное расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями долговечности.

Когаев В.П. уточнил линейную гипотезу, предложив скорректированное правило суммирования повреждений. Формула Когаева-Серенсена для ресурса детали, выраженного числом блоков нагружения λ до появления первой макроскопической трещины длиной более 0,5 мм, имеет вид:

$$\lambda = \frac{K_{\text{кор}} \tau_{-1д}^m N_0}{\sum_{(\tau_{\alpha i} \geq \tau_{-1д})} \tau_{\alpha i}^m v_{i\sigma}}$$

Однако величина корректирующего коэффициента $K_{\text{кор}}$ изменяется в широких пределах, поэтому были высказаны сомнения в справедливости линейной гипотезы. Это не отражается в расчетных зависимостях ресурса по линейному правилу, которое не учитывает историю нагружения. Применение нелинейных моделей вызывает затруднение, связанное с оценкой влияния истории нагружения на процесс накопления усталостных повреждений.

Поэтому для расчета математического ожидания и построения кривой распределения долговечности использован метод Монте-Карло [3].

Расчет долговечности выполнен по формуле Когаева-Серенсена на основании линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, основанной на том, что повреждение детали от очередного опасного цикла напряжений суммируется с повреждениями, вызванными предыдущими опасными циклами.

$$n_{\text{зг}} = \frac{K_{\text{кор}} \tau_{-1шп}^{m_{\alpha}} N_0}{\sum_{i=1}^{n_{\text{о.ц}}} \tau_{\text{пр}i}^{m_{\alpha}}}$$

где $K_{\text{кор}}$ — корректирующий коэффициент; $\tau_{\text{пр}i}$ — приведенная к симметричному циклу амплитуда i -го опасного цикла напряжения, $\tau_{\text{пр}i} > 0,6 \tau_{-1шп}$; $n_{\text{о.ц}}$ — число опасных циклов.

Корректирующий коэффициент

$$K_{\text{кор}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{о.ц}}} \tau_{\text{пр}i}}{n_{\text{ц}} - 0,6 \tau_{-1шп}} - 0,6 \tau_{-1шп} \geq 0,2,$$

где $n_{\text{ц}}$ — общее число циклов на осциллограмме напряжений, учтенное за время переходного процесса.

Параметры, входящие в формулу Серенсена-Когаева, имеют рассеяние и рассматриваются как случайные величины, т.е. долговечность рассчитывается в вероятностном плане.

Согласно методу Монте-Карло, для разыгрывания некоторой случайной величины X , равномерно распределенной в интервале $[X_1, X_2]$, используется выражение $X = X_1 + X_{[0,1]}(X_2 - X_1)$, где $X_{[0,1]}$ — равномерно распределенная в интервале $[0,1]$ некоторая величина, разыгрываемая генератором случайных чисел.

Для величин $\tau_{-1шп}$, N_0 , m_{α} , $\tau_{\text{пр}i}$, при их разбросе на величину $\pm 20\%$ от математических ожиданий $\bar{\tau}_{-1шп}$, \bar{N}_0 , \bar{m}_{α} , $\bar{\tau}_{\text{пр}i}$, справедливы следующие формулы:

$$\begin{aligned} \tau_{-1шп} &= (0,8 + 0,4X_{[0,1]}) \bar{\tau}_{-1шп}; & N_0 &= (0,8 + 0,4X_{[0,1]}) \bar{N}_0; \\ m_{\alpha} &= (0,8 + 0,4X_{[0,1]}) \bar{m}_{\alpha}; & \tau_{\text{пр}i} &= (0,8 + 0,4X_{[0,1]}) \bar{\tau}_{\text{пр}i}. \end{aligned}$$

Для вычисления математического ожидания $\bar{N}_{зг}$ величины $N_{зг}$ и среднеквадратического отклонения выполнено более 1000 розыгрышей.

Внезапный выход из строя шпинделя прокатного стана при эксплуатации часто приводит к гораздо большим материальным затратам, чем заблаговременная замена шпинделя по причине выработки им ресурса, что делает актуальной задачу прогнозирования его усталостной долговечности.

Литература

1. Колесников А.Г. Технологическое оборудование прокатного производства: учебное пособие / А.Г. Колесников, Р.А. Яковлев, А.А. Мальцев. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 158 с.
2. Даева Н. Н. Расчет крутильных колебаний в линии привода прокатного стана 280 ОАО «РМЗ». [\[Электронный ресурс\]](#) //Вторая Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая весна 2009: Машиностроительные технологии» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Электрон. дан. – М.: МГТУ, 2009. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: ПЭВМ, ОС Windows.
3. Мальцев А.А. Исследование динамики и прогнозирование долговечности привода прокатного стана: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы динамики и надежности металлургического оборудования» – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 35 с.

УДК 621.771.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВАКУУМИРОВАНИЯ И НАГРЕВА МНОГОСЛОЙНЫХ СТАЛЬНЫХ ПАКЕТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Эльмар Агакишиевич Салманов⁽¹⁾, Сергей Дмитриевич Скачков⁽²⁾

Студент 3 курса^{(1), (2)}

кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.С. Шинкарёв

ассистент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»

Введение

С ростом потребности в материалах с повышенными механическими свойствами в промышленности происходит освоение производства металлических материалов с ультрамелкозернистой структурой. Среди большого разнообразия технологических процессов получения конструкционных материалов наиболее эффективным и экономичным является производство листовых материалов методом прокатки.

Особое место занимает прокатка многослойных материалов в вакууме. Использование этого метода дает возможность снизить содержание газов в металле и защитить заготовки от окисления, улучшает свариваемость металлических заготовок. Отсутствие окисных и адсорбированных пленок на контактных поверхностях металлов при пластической деформации в вакууме способствует их взаимодействию и получению в результате этого качественного соединения.

Целью данной работы являлось измерение давления в герметичной капсуле, содержащей пакет многослойных листов, при одновременном проведении процессов вакуумирования и нагрева капсулы.

Материалы и методы

В основу способа получения многослойных материалов с ультрамелкозернистой структурой методом горячей прокатки, разработанного в МГТУ имени Н.Э. Баумана [1-3] положено использование чередующих слоев сталей, имеющих различное кристаллическое строение в интервале температур горячей обработки давлением (рисунок 1).

В качестве исходных материалов в работе использовались стали марок 08X18H10 и 08кп. В соответствии с технологическим маршрутом [4-5] получения многослойных материалов пластины исходных материалов вырубаются из холоднокатаного листа на гильотинных ножницах по 42 пластинки двух марок сталей, после чего проходят очистку поверхности. Размеры пластин составляют: ширина 58 мм, длина 236 мм, толщина 0,5 мм. Очищенные пластины укладываются в пакет, чередуясь через одну. Собранный пакет проваривается по боковой поверхности, чтобы при прокатке слои в капсуле были зафиксированы и не скользили друг относительно друга, затем пакет укладывается в капсулу (рисунок 2).

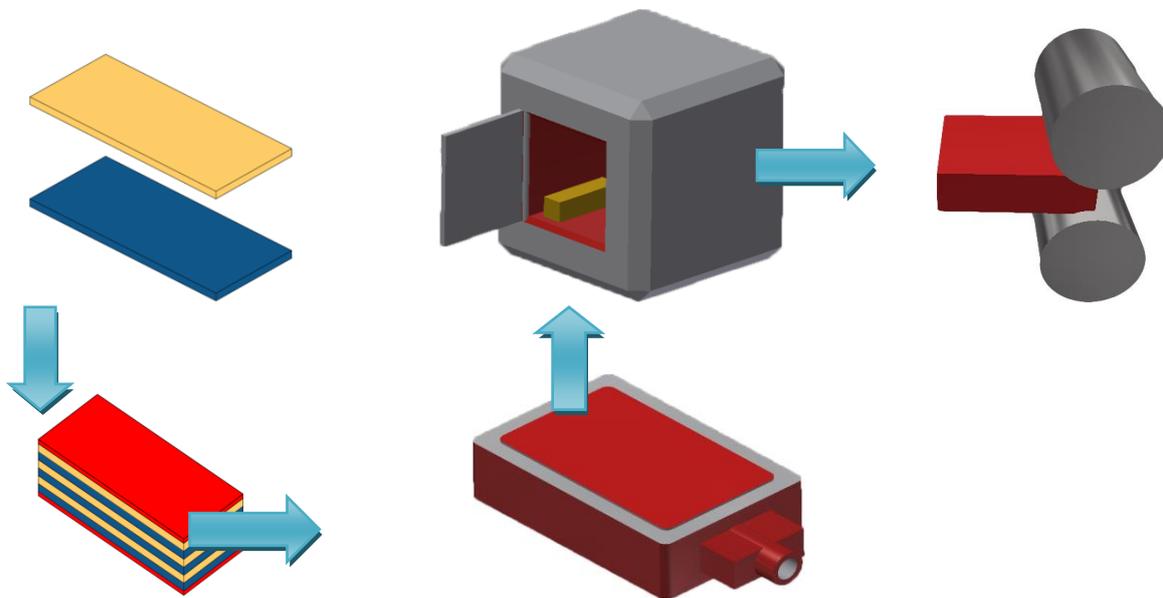


Рис. 1. Технологический процесс прокатки многослойных материалов



Рис. 2. Капсула для пакета

Капсула представляет собой металлический контейнер с отверстием на одной из боковых поверхностей, к которой приварен фартук с трубкой. Такая конструкция позволяет осуществлять вакуумирование при помощи вакуумного насоса 2НВР-5ДМ и герметизацию заготовок на шовной машине МШ-1601УХЛ4. После вакуумирования фартук обрезается. С

целью исключить сваривание наружной поверхности пакета с капсулой при прокатке используются жаропрочные обкладки.

Для испытаний было собрано 4 капсулы все они собирались по одной технологии. На первом этапе эксперимента проводилось исходное вакуумирование заготовки, которое осуществлялось путем подключения к вакуумному насосу через гибкий шланг. Параллельно с этим отдельно стоящая электроплитка нагревалась до максимально возможной температуры, составляющей 450 °С. Затем отвакуумированная капсула, подключенная к вакуумному насосу, устанавливалась на нагретую электроплитку. Во время процесса нагрева проводилось измерение давления в капсуле и температуры на ее поверхности (рисунок 3).

Для измерения давления в капсуле использовался вакуумметр термопарный ВИТ-2П, укомплектованный манометрическим термопарным преобразователем ПМТ-2 (рисунок 4). Рабочий диапазон давлений: $5 \cdot 10^0 - 1 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. ($666.6 - 1.33 \cdot 10^{-1}$ Па). Диапазон изменения ЭДС термпары: 0-10 мВ. Для бесконтактного измерения и наглядного наблюдения за изменением температуры в ходе эксперимента, а так же для графической визуализации распределения нагревания заготовки использовали Тепловизор Optis, модификации "PI".

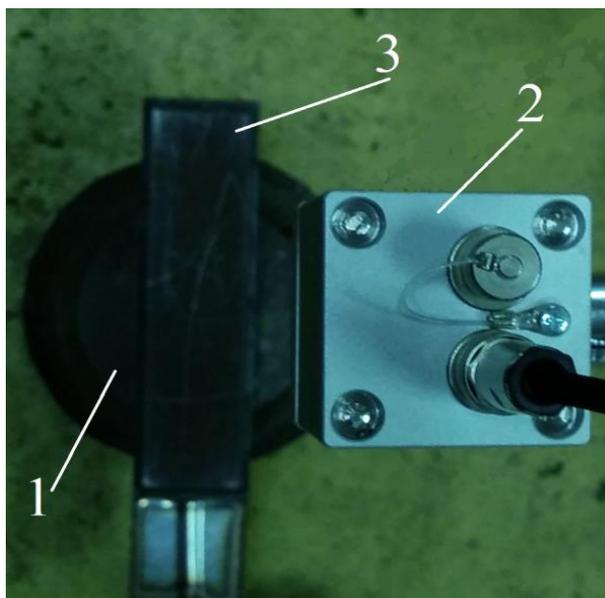


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки
1 - Электроплитка; 2 – тепловизор; 3 – капсула



Рис. 4. Преобразователь манометрический термопарный ПМТ-2

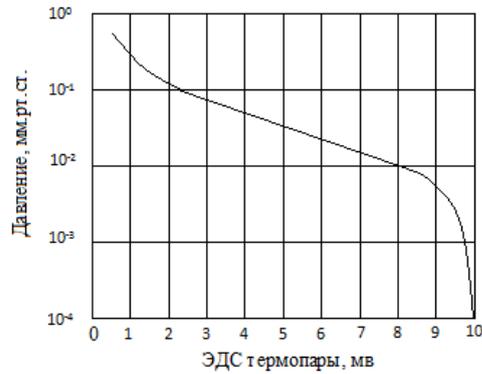


Рис. 5. Градуировочная кривая термопарного манометра ПМТ-2 [7]

Известны эксперименты по вакуумированию биметаллических пакетов сталей 08X18H10T и ст 3 [8], в ходе этих работ было установлено, что в герметичном пакете без использования дополнительного разделительного слоя происходит обезуглероживание углеродистой стали с образованием оксидов NiO, Cr₂O₃ и Fe₃O₄, а также науглероживание стали 08X18H10T; проводятся данные о выделении газов азота и оксида углерода.

Результаты

При первоначальном вакуумировании, проводившемся при комнатной температуре, остаточное давление в капсуле составило $6,7 \cdot 10^{-7}$ МПа. Затем капсулы нагревались в течение 2 часов, при этом были построены графики изменения температур на поверхности заготовки и нагревательного прибора (рисунок 6, 7). Перепад температуры между серединой и краями капсулы составил около 60 °С.

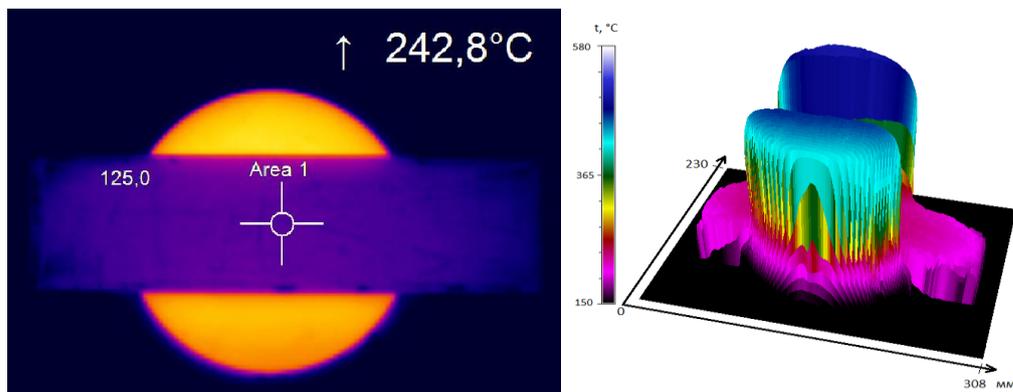


Рис. 6. Тепловизионное изображение нагретой заготовки.

Ход процессов вакуумирования и нагрева показан на диаграмме зависимости давления в герметичной капсуле от времени нагрева (рисунок 8). По графику видно, что в течение 120 минут многослойный пакет нагревался и одновременно вакуумировался. Максимальная величина давления газов в капсуле была достигнута на 80 минуте и составила $4,7 \cdot 10^{-6}$ МПа. В дальнейшем давление в капсуле уменьшалось до 120 минуты, что обусловлено, по-видимому, менее интенсивным выделением газов. Затем в ходе 15 минутной выдержки давление в пакете не изменялось.

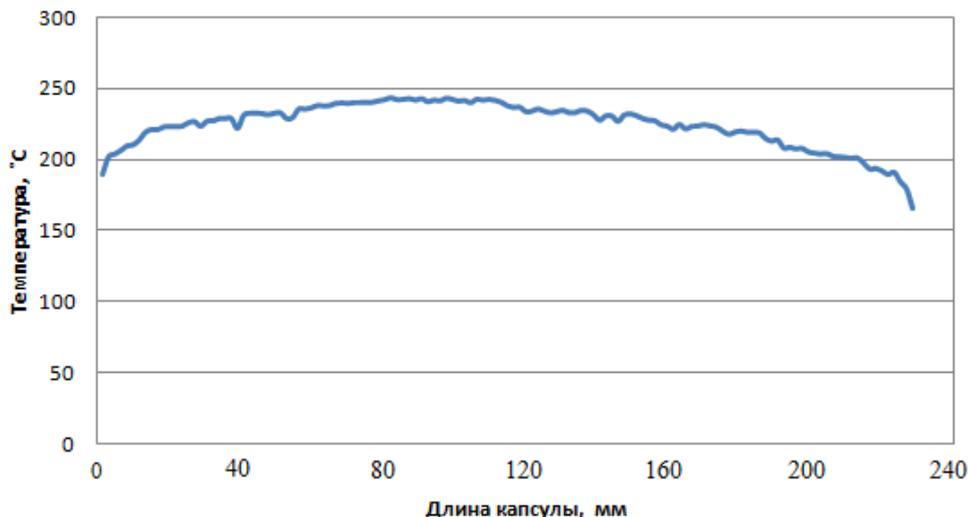


Рис. 7. Распределение температуры по поверхности заготовки (в продольном направлении) при нагревании заготовки до 250°C

В момент времени, соответствующий 135 минутам от начала нагревания заготовку сняли с плитки, при этом максимальная температура поверхности заготовки составила 250 °С, что дает основания предполагать, что максимальное значение температуры в ее средней части составляет около 300°C. Поскольку вакуумный насос не отключался от капсулы с течением времени давление в капсуле начало снижаться, т.е. степень вакуума повышалась по мере охлаждения: при температуре 180 значение давления составило $0,67 \cdot 10^{-6}$ МПа, при температуре 160 °С вакуум достиг $0,4 \cdot 10^{-6}$ МПа, после давление не изменялось.

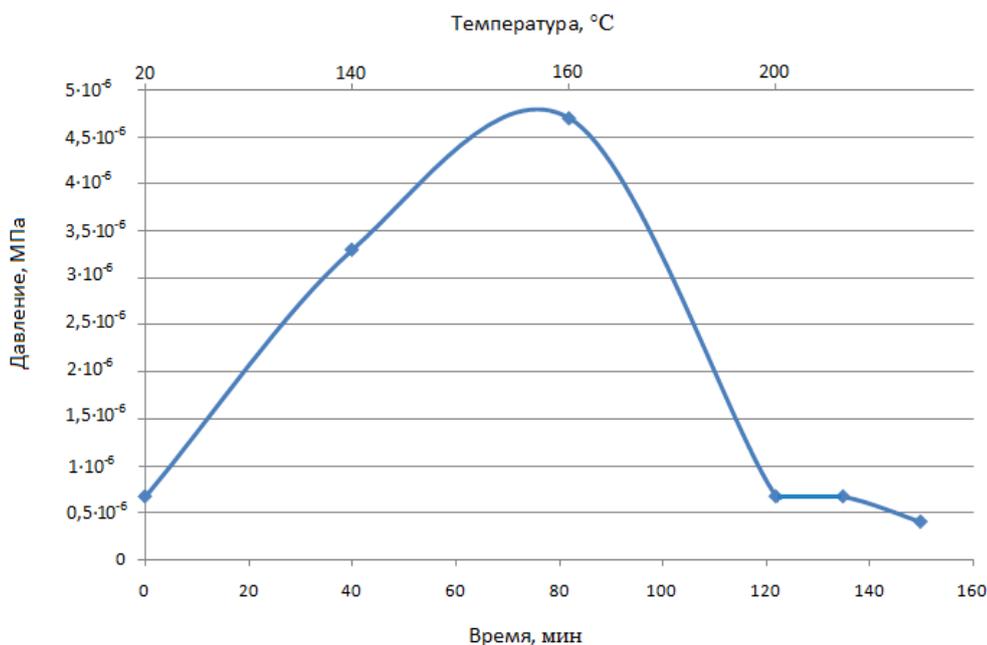


Рис. 8. Зависимость давления в герметичной капсуле от времени нагрева.

Заключение

В зависимости от времени нагрева по мере прогревания капсулы остаточное давление в капсуле увеличивается в виду выделения газов азота, содержащихся в металле, а также реакции остаточного кислорода с углеродом из углеродистой стали. Сравнение исходной и конечной величины давления, позволяет заключить, что нагревание капсулы и одновременное вакуумирование способствует уменьшению содержания остаточных газов и позволяет повысить степень вакуума в герметичной капсуле.

Литература

1. Колесников А. Г., Мечиев Ш. Т., Панова И. Ю. Состояние и перспективы применения многослойных металлических заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – №1. С. 42-43
2. Колесников А.Г., Плохих А.И., Комиссарчук Ю.С., Михальцевич И.Ю. Исследование особенностей формирования субмикро- и наноразмерной структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки // МиТОМ.–2010.– № 6. С. 44-49
3. Пат. 2380234 Российская Федерация, МПК В 32 В 15/00. Способ получения металлических листов со стабильной субмикро- и наноразмерной структурой / А.Г. Колесников, А.И. Плохих, Ш.Т. Мечиев, И.Ю. Михальцевич; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э.Баумана.- N 2008132750/02; заявл. 08.08.2008; опубл. 27.01.2010., Бюл. № 3.-6 с.
4. Арюлин С.Б., Халипов И.В. Получение многослойных композиционных материалов методом горячей прокатки Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 7. С. 31-35.
5. Колесников А. Г., Плохих А. И., Шинкарев А. С., Миронова М. О. Прокатка стального многослойного материала / Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 8. – С. 39-42.
6. Шешин Е.П. Основы вакуумной техники: Учебное пособие. — М.: МФТИ, 2001. — 124 с.
7. Руководство по эксплуатации вакуумметра ВИТ-2.
8. Кобелев А.Г., Лысак В.И., Чернышов В.Н. и др. Производство слоистых композиционных материалов. М.: Интермет-Инжиниринг, 2002. – 496 с.

Секция XI

Электронные технологии в машиностроении

Председатель:

Панфилов Юрий Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Электронные технологии в машиностроении» (МТ-11), МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Ученый секретарь:

Бычков Сергей Павлович

ассистент кафедры «Электронные технологии в
машиностроении» (МТ-11), МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.3.095.2

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ ТОЛСТЫХ СЛОЕВ НЕГАТИВНОГО ФОТОРЕЗИСТА

Михаил Михайлович Андроник

Студент 4 курса

Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.С. Боброва

ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Точность фотолитографического процесса в большой мере определяется экспонированием. Поскольку контактное экспонирование ограничено явлениями дифракции, то определение и учёт этих ограничений при производстве повышает точность и технологичность изделия в целом. Рассмотренные в статье процессы фотолитографии толстых слоев фоторезиста (толщиной свыше 75 мкм) обусловлены необходимостью формирования диэлектрических слоев в микрокоммутационных платах при высокоплотной интеграции бескорпусных кристаллов, а также при создании плат источников питания, требующих толстых проводников, получаемых по позитивной технологии гальваническим наращиванием полостей в фоторезисте.

Критические размеры (КР), достигнутые после экспонирования фоторезиста, зависят от множества факторов. На рис. 1 показана диаграмма Исикавы, которая наглядно показывает причинно-следственные взаимосвязи между факторами, влияющими на КР.

Анализируя диаграмму, выделяем 2 главных источника погрешностей:

- обеспечение точно заданной дозы экспонирования, которая зависит от параметров оборудования;
- распределение интенсивности по толщине фоторезиста, которое зависит от свойств фоторезиста и от технологических параметров экспонирования, определяемые физическими свойствами актиничного излучения.

В данной работе уделяется особое внимание явлению дифракции. Дифракция происходит при прохождении света через малую щель при длинах волн сопоставимые с размером щели. Важным фактором является расстояние от щели до плоскости наблюдения дифракции. Данные параметры находят отражение в технологии фотолитографии, размер щели – это не что иное, как половина отношения проводник зазор, а расстояние – толщина фоторезиста.

Учитывая явление дифракции, можно определить максимальное отношение «высота/ширина», при котором получаемый размер не выходит из заданного допуска. Обычно принято допустимое отклонение КР, получаемого на операции фотолитографии 10% от номинального. Экспонирование обычно несет 25% от погрешности фотолитографии и является наиболее чувствительной операцией [2]. Выходя за рамки фотолитографии, только травление может принести больше вклад в погрешность выходного размера. Но, как было упомянуто выше, толстые слои фоторезиста используются для позитивной технологии гальванического наращивания проводников, что не требует операции травления.

Учет свойств фоторезиста позволяет перенести результаты моделирования процесса на конкретный случай. Такими свойствами являются:

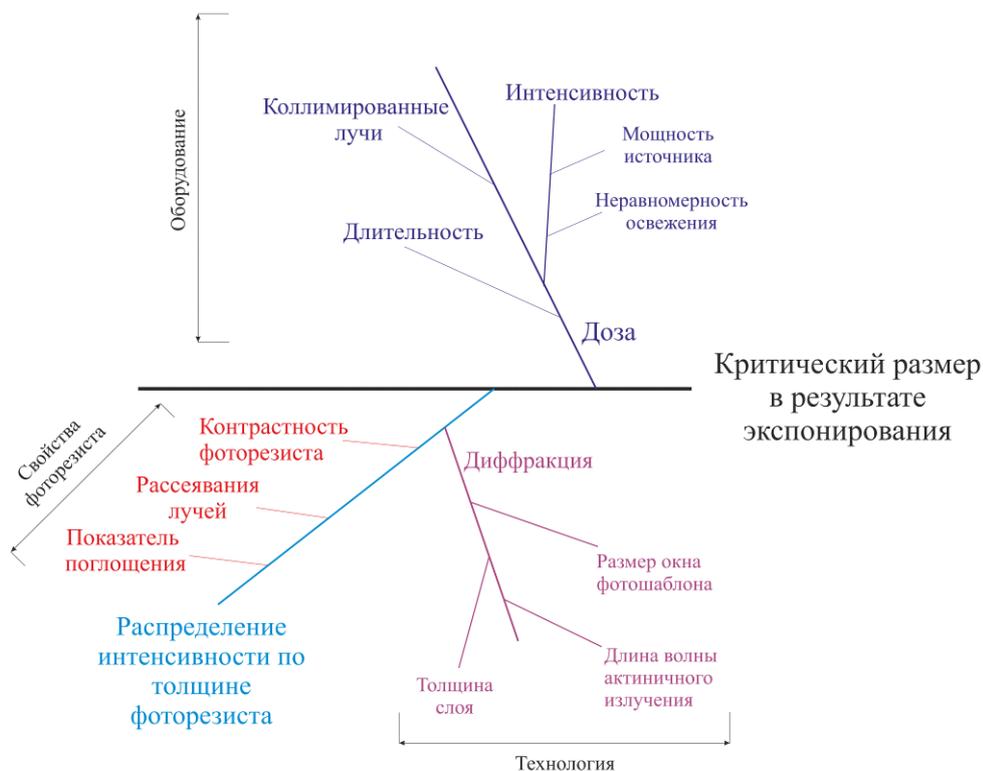


Рис. 1. Диаграмма Исикавы: Факторы, влияющие на выходной параметр КР

Контрастность фоторезиста γ (1), определяется через дозу экспонирования необходимую для начала сшивки негативного фоторезиста (E_0) и номинальную дозу экспонирования при данной толщине слоя (E_1). E_0 определяют возможность получения определенных краев при одном и тоже дифракционном рисунке [3].

$$\gamma = \left(\lg \frac{E_1}{E_0} \right)^{-1} \tag{1}$$

Показатель поглощения α (2) указывает расстояние h , которое проходит луч через фоторезист, при котором интенсивность актиничного излучения (I_0) уменьшается в e раз. Данное явление описано законом Бугера-Ламберта-Бера (2) [3].

$$I = I_0 e^{-\alpha h} \tag{2}$$

Рассеивание лучей – отклонение падающего коллимированного пучка на угол ϕ от нормали к поверхности. Излучение, рассеянное в прямом и обратном направлениях, вызывает увеличение основанного изображения, увеличивая ширину линии [1].

При моделирование контактное экспонирование толстых слоев фотополимера дальнейшая неотъемлемой задачей является учет свойств фоторезиста.

Правильный выбор материалов, оборудования и технологии позволит снизить экономические затраты на производства изделия. Процесс фотолитографии всегда занимал большую часть по затратам, его доля составляет примерно 1/3 от общего числа затрат, опережая тестирование и вакуумные процессы. Процесс совмещения и экспонирования затрагивает почти 2/3 из затрат фотолитографии и является наиболее влияющая операция на КР [1].

Экспонирование толстых слоев фоторезиста применяется для:

- Формирования диэлектрических слоев для последующего монтажа безкорпусного утонённого кристалла в углубление. Толщина утонённого кристалла составляет от 75 до 125 мкм, что накладывает ограничения на толщину фоторезиста с диэлектрическими свойствами. Такими фоторезистами являются SU-8 (до 10 МГц) и Cyclozene (может быть использован для

ГГц-диапазона). Данный способ, уменьшая протяженность межсоединений, снижает потери и затухание сигнала, повышая предельную рабочую частоту платы.

- Создания плат источников питания. Особые требования предъявляются к проводникам источников питания, а именно к площади поперечного сечения. Для обеспечения миниатюризации платы ширина проводников должно быть наименьшая, следовательно, вырастает высота проводников, которая может превышать 100 мкм. Последующее моделирование проводится для типовых размеров данной технологии, и имеет цель выявления ограничений из-за явлений дифракции. Результаты данной работы могут быть сопоставлены с требованиями по технологическому допуску получаемых проводников.

Моделирование

Данная модель построена с учетом волновой природы света и основана на принципе Гюйгенса. В ее основе лежит скалярная теория дифракции Френеля – Кирхгофа. Расчет проводится для узкой длиной щели. В данной модели интенсивность света рассчитывается, как функция, зависящая от длины волны актиничного излучения λ , размера окна w в фотошаблоне, расстояния от фотошаблона h и от координаты относительно центра ширины линии (x).

Интенсивность рассчитывается по формуле 3:

$$I(x_i) = 0,5 \left[(C(\xi_2) - C(\xi_1))^2 + (S(\xi_2) - S(\xi_1))^2 \right] \quad (3)$$

Где $C(\alpha)$ и $S(\alpha)$ интегралы Френеля:

$$C(\alpha) = \int_0^\alpha \cos \frac{\pi t^2}{2} dt, \quad S(\alpha) = \int_0^\alpha \sin \frac{\pi t^2}{2} dt, \quad (4)$$

а ξ_1 и ξ_2 пределы интегрирования

$$\xi_1 = -\sqrt{\frac{k}{\pi z}} \left(x_i + \frac{W}{2} \right), \quad \xi_2 = \sqrt{\frac{k}{\pi z}} \left(-x_i + \frac{W}{2} \right) \quad (5)$$

Для понимания и вывода формул 3,4,5 рекомендуется литература [3].

Определение минимального окна фотошаблона для достижения допустимого критического размера при толщине 120 мкм

Важным параметром является аспектное соотношение, в данном случае - отношение ширины линии к ее высоте. Достижение его минимального значения обеспечивает миниатюризацию на уровне платы. На данном уровне групповые процессы часто невозможны, что снижает производительность процесса и повышает чувствительность к стоимости изделия. В таких условиях приветствуется использование менее дорогих технологий. Контактная фотолитография выделяется как недорогая по сравнению с проекционной фотолитографией. Определение пределов применимости данной технологии позволит наиболее эффективно использовать ее с минимальными затратами.

Дифракция при контактной фотолитографии является одним из наиболее влияющих факторов для получения критических размеров. Степень коллимации пучка, контрастность фоторезиста тоже являются важными параметрами получения КР.

Допущения:

- идеально коллимированный пучок (365нм);
- отсутствие поглощения, отражение от подложки и рассеяние актиничного излучения.

На рис. 2 показан график распределения интенсивности на нижних слоях фоторезиста, при длинах волн излучения 365 нм, при контактном экспонировании вдоль ширины окна x для различных размеров окон от 1 до 100 мкм.

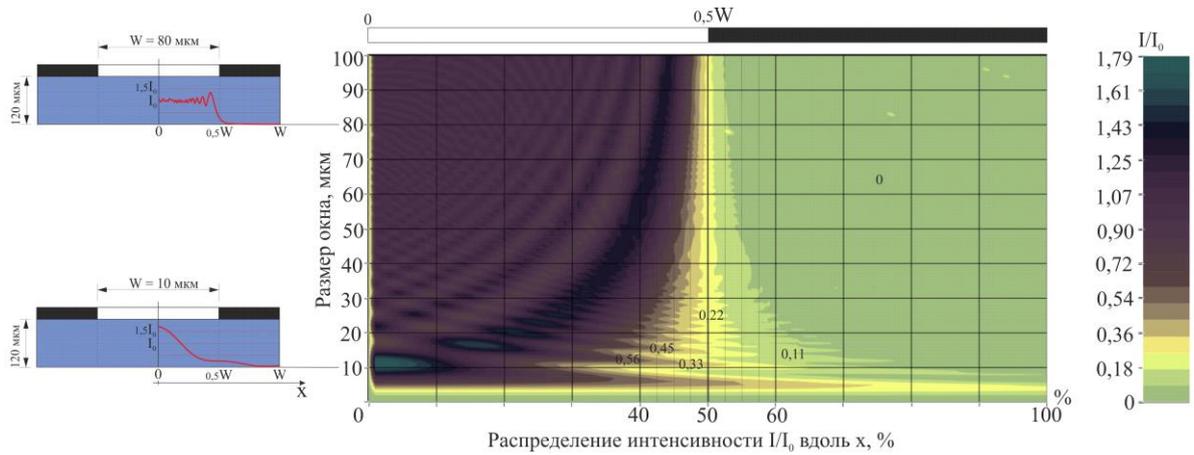


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения вдоль ширины окна фотошаблона при различных ширинах окон w на максимальной глубине фоторезиста

Для наглядности применимости данной модели приведем сведения для 3-х слойного фоторезиста Ordyl Alpha, с толщиной одного слоя – 40 мкм. На рис. 3 иллюстрирован график зависимости дозы экспонирования от толщины слоя фоторезиста Ordyl Alpha серии 300. Серые точки указывают на рекомендуемые изготовителем дозы экспонирования, а красные соответствуют дозами экспериментально полученные в лаборатории 400 юа кафедры МТ11, МГТУ им. Н.Э. Баумана, которые имели наилучшее отношение проводник-зазор. Данные результаты подтвердили предположение о линейном характере данного графика. Линейная зависимость дозы от толщины замечается и у других негативных фоторезистов и подтверждается в определении контрастности фоторезиста в источнике [3]. Другим важным параметром, определяемый из рис.3, является теоретическая минимальная доза начала сшивки фоторезиста, $E_0=25,6 \text{ мДж/см}^2$.

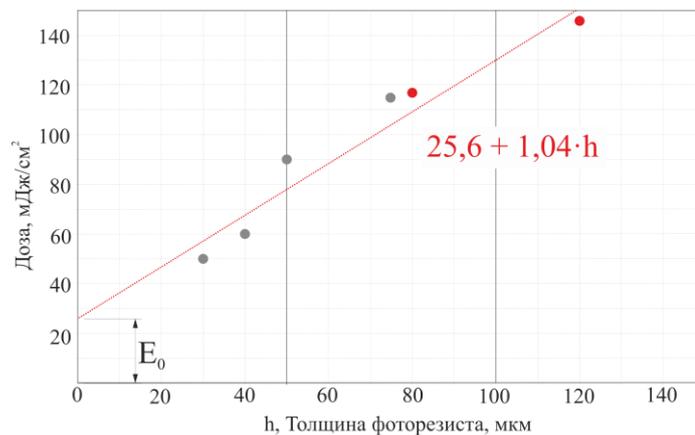


Рис. 3. Зависимость дозы экспонирования от толщины слоя негативного фоторезиста Ordyl Alpha серии 300

Анализируя рис.2 совместно с рис.3, можно найти толщину, при которой явление дифракции уже недопустимо (точность критического размера превышает требуемый допуск). Из рис. 3 следует, что для $E_1/E_0=0,11$, доза недостаточна для начала процесса сшивки фоторезиста, $E_1/E_0=0,22$ – толщина сшивки 6 мкм, $E_1/E_0=0,33$ – 23 мкм. В табл. 1 записаны данные расчета отклонения размера от номинальном.

Таблица 1. Отклонения размера от номинального при различных w

W, мкм	I/I_0	отклонения, %	ширина просвета, мкм	толщина сшивки при данной I/I_0 , мкм
80	0,22	1,25	1	6
60	0,22	2,5	1,5	6

40	0,22	2,5	2	6
30	0,22	10	3	6
20	0,22	20	4	6

В качестве сравнения приведем профиль распределения интенсивности по толщине фоторезиста для ширины окна $w = 20$ мкм (рис. 4, а), $w = 30$ мкм (рис. 4, б) и $w=60$ мкм (рис. 4, в). При $w=20$ мкм заметно выраженное влияние дифракции, отклонения размера от номинального при 100% дозе экспонирования превышает 20%. При $w=30$ мкм, замечается уменьшение влияние дифракции, но отклонение размера на 10 % является недопустимым. Обычно на операции фотолитографии допускается 10 % отклонение критического размера от номинального, из которых 2% составляет погрешность измерения, 3% - погрешность совмещения [2]. Учитывая остальные операции фотолитографии, только 25% из всего отставшего относиться к экспонированию. В результате погрешность экспонирования составляет 1,25%. Такой результат может быть получен только при ширине окна, превышающей 80 мкм (рис. 4, г).

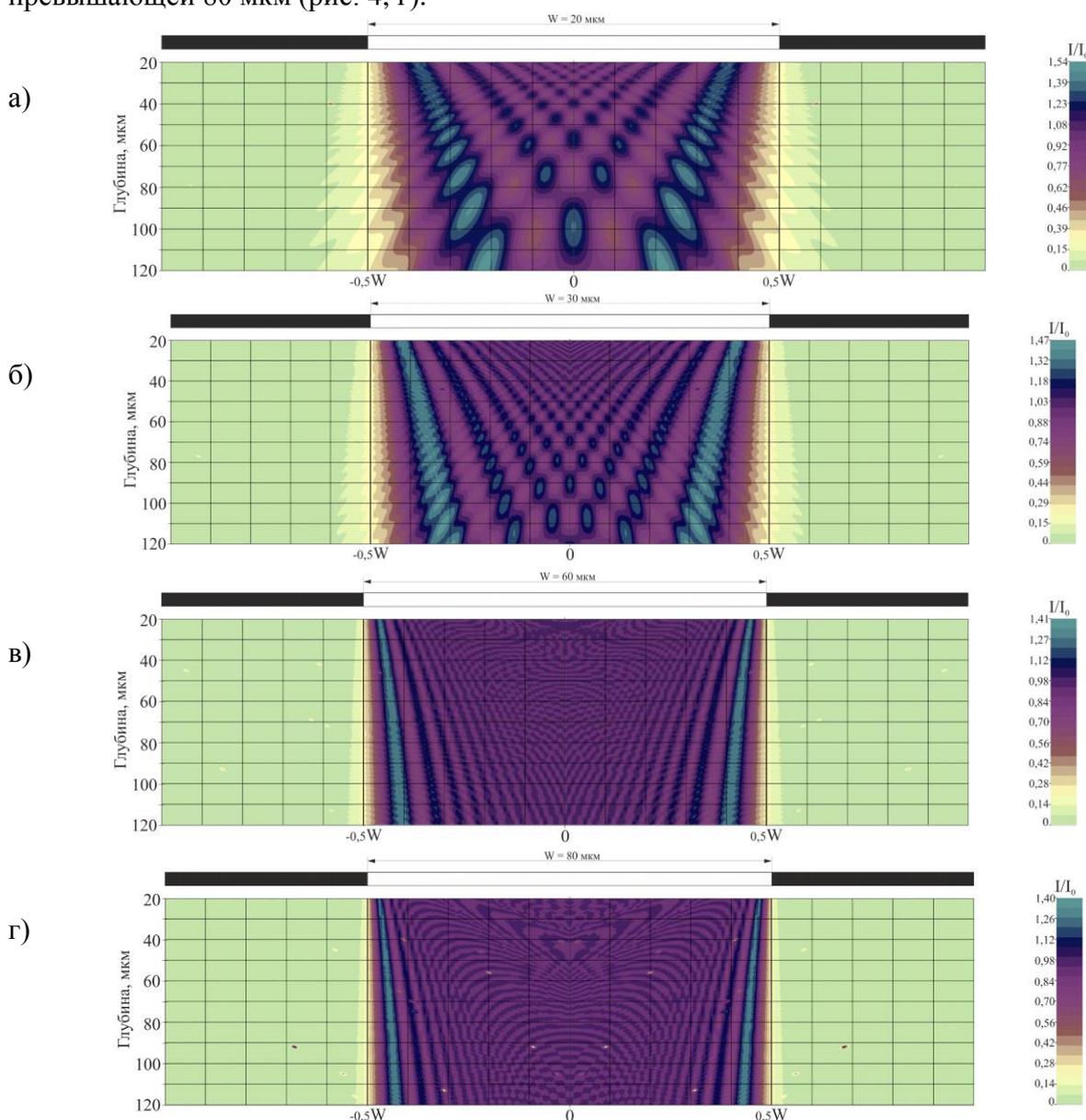


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении фоторезиста

Заключение

Процесс экспонирования должен проводиться при минимальных отклонениях критического размера от номинального и не должен превышать 1,25% от конечного размера. Моделирование явления дифракции, показывает, что при таких значениях погрешностей для толщины 120 мкм, ширина окна в фотошаблоне должна превышать 80 мкм, что соответствует аспектному соотношению 1:1,5. Дальнейший учет поглощения и рассеяния лучей позволит построить более адекватную модель, с помощью которой будет возможно предсказание фотошаблона, для получения нужной топологии.

Литература

1. *Моро У.*, Микролитография: В 2-х частей. Ч. 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 605 с., ил.
2. *Г. Трапашко*, статья: Контроль микроразмеров в производстве ИС. Задачи и особенности», *Электроника Наука, Технология, Бизнес*, N3, 2011
3. *С.П. Бычков, В.П. Михайлов, Ю.В. Панфилов, Ю.Б. Цветков*; Под ред. Ю.Б. Цветкова, *Физические основы микро- и нанотехнологий: Учеб. Пособие*, М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 176 с.: ил.

УДК 537.58

СПОСОБ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК

Наталья Владимировна Баданова

Магистрант 1 года

кафедра "Электронные технологии в машиностроении"

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Л.Л. Колесник

кандидат технических наук, доцент кафедры "Электронные технологии в машиностроении"

Введение

Сегодня в мире существует очень много технологий, которые невозможно было представить десять-пятнадцать лет назад. Это всевозможные гаджеты в медицине и во всех отраслях науки, в бизнесе, строительстве и в других сферах деятельности, смартфоны, ультрабуки, планшеты и многое другое. На их перечисление уйдут многие месяцы, если не годы. В основе всей этой электроники лежат микросхемы, которые можно изготавливать различными способами. На протяжении многих лет эти методы совершенствуются или появляются новые, более приемлемые и усовершенствованные.

Совершенствование электронной техники сопровождается увеличением удельной тепловой мощности, что неизменно приводит к возникновению проблемы теплоотвода и необходимости снижения теплового сопротивления цепи. Отвод тепла через подложку, на которой размещаются тепловыделяющие чипы, является простым и удобным средством снижения теплового сопротивления цепи и, соответственно, температуры полупроводниковых элементов. Одним из важнейших вопросов при этом является выбор материалов с высокой теплопроводностью. В последнее время керамика на основе нитрида алюминия (AlN) привлекает всё большее внимание в качестве перспективного теплопроводящего материала для использования в электронной технике. В таблице 1 сравниваются типичные свойства четырёх керамических материалов, которые в настоящее время используются в электронных приборах в качестве подложки. В связи с уникальным сочетанием физических свойств, например, высокой теплопроводности, высокого электрического сопротивления и коэффициента теплового

расширения (КТР), близкого к КТР кремния, нитрид алюминия (AlN) становится ключевым материалом, используемым в качестве подложки для электронных приборов высокой мощности.

Таблица 1. Электрофизические характеристики керамических материалов из оксида алюминия (Al₂O₃), карбида кремния (SiC), нитрида алюминия (AlN) и оксида бериллия (BeO) по данным зарубежных и отечественных источников [3]

Физические свойства	Al ₂ O ₃	SiC	AlN	BeO
Теплопроводность при 25°C, Вт/мК	20...30	150	160...240	220...240
Прочность на изгиб, МПа	300...350	320...350	250...300	170...230
Электрическая прочность при 25°C, кВ/мм	14...18	0,07	14...17	10
Удельное электросопротивление при 25°C, Ом см	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴
Диэлектрическая постоянная при 25°C на частоте 1МГц	8,5...10	40...42	8,8...8,9	6,5...6,7
Тангенс угла диэлектрических потерь (x10 ⁻⁴) на частоте 1 МГц	2...3	500	1...5	1...5
Коэффициент температурного линейного расширения (x10 ⁻⁶ /°C) в диапазоне температур 25...400°C (для кремния 3,5...4,0 x10 ⁻⁶ /°C)	6,7...7,3	3,7	4,3...4,6	7,5...8,0
Плотность, г/см ³	3,97	3,21	3,26	3,01
Модуль Юнга, ГПа	378	460	343	378

Основные сведения об используемом методе

Одной из ключевых технологических операций в процессе производства силовых модулей является проведение металлизации керамической подложки. Металлизация совместно с последующими операциями формирования топологии токопроводящих дорожек обеспечивает необходимую функциональность подложки в части передачи электрических сигналов между электронными компонентами, которые будут смонтированы на подложке в дальнейшем. В данной работе в качестве основного метода металлизации будет рассмотрено пароструйное осаждение тонкопленочных металлических покрытий Jet Vapor Deposition (JVD) - англоязычный термин.

Паровое осаждение покрытий делится на 2 группы: химическое осаждение из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition (CVD)) и конденсация с ионной бомбардировкой (Physical Vapor Deposition (PVD)) в соответствии по способу генерации компонентов покрытия. Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) производит энергонезависимую твердую пленку на подложке благодаря реакции поверхностного пиролиза газообразных реагентов, содержащих желаемые компоненты пленки.

Процесс CVD включает следующие шаги:

- 1) Газообразный реагент и инертный газ-носитель вводят в вакуумную камеру
- 2) Газообразный реагент транспортируется за счет конвекции и диффузии к поверхности подложки
- 3) Одна часть газообразного реагента абсорбируется на подложке, где она подвергаются миграции и пленкообразующей реакции
- 4) Газообразные побочные продукты реакции и неиспользованная другая часть реагентов удаляют из камеры.

Давление в камере, где происходит процесс осаждения, может быть атмосферным или пониженным до 1 Торр.

Энергия, необходимая для проведения реакции пленкообразования на поверхности, подводится к подложке в виде тепла. Обычно подложку нагревают в диапазоне температур от 500°C до 1600°C, следовательно, в данном методе нельзя использовать чувствительные к такому нагреву подложки.

Скорость осаждения CVD зависит от концентрации газообразного реагента вблизи поверхности подложки. Газовая фаза массообмена за счет диффузии может ограничить осаждение на поверхности субстратов.

Также градиент концентрации реагента может вызвать неравномерное осаждение на поверхность подложки. Увеличение парциального давления реагента может привести к повышению скорости осаждения. Тем не менее, при слишком большой концентрации реагента происходит зарождение твердых частиц в газовой фазе, что нежелательно. Затем эти частицы осаждаются на поверхности подложки, где они мешают росту покрытия.

Это подталкивает к созданию нового метода нанесения тонкопленочных покрытий, которые позволяют избежать проблем с образованием из частиц ядра газовой фазы и которые осуществляются при более низких температурах. К тому же, полезно иметь метод, который позволяет избежать ограничения доставки диффузионной массы к подложке.

Кроме того, некоторые CVD газы очень токсичны. Для производства металлизированных подложек данным методом требуется специально обученный персонал, который может работать с токсичными газами.



Рис. 1. Схема процесса химического осаждения из газовой фазы

Физическое осаждение из паровой фазы (PVD) или конденсация с ионной бомбардировкой (термин в русскоязычной литературе) включает в себя испарение материала, металлизация, распыление, молекулярно-лучевую эпитаксию и газофазную эпитаксию. Эти процессы, как правило, происходят в камере с вакуумом ниже 10^{-6} Торр. При таком давлении газ и молекулы пара или ионы сталкиваются со стенками камеры чаще, чем друг с другом. Желаемый материал пленки присутствует в камере в виде сыпучего материала. Материал превращается из конденсированной фазы в паровую с использованием тепловой энергии (т.е. испарение) или передача импульса (т.е. напыление). Атомы пара или молекулы двигаются как свободные «молекулярные лучи» во всех направлениях в камере, где они конденсируются на подготовленных основах и на стенки камеры в виде тонкой пленки. Если давление становится слишком высоким, столкновения с молекулами газа мешают транспортировке пара, которые снижают скорость осаждения.

При реактивном испарении и распылении необходимо вводить в камеру кислород, азот или другой инертный газ для того, чтобы сформировать оксид, нитрид или другие сложные тонкие пленки. Реактивное давление газа должно быть ограничено, для того, чтобы избежать вмешательства с транспортировкой осаждаемых молекул пара. Когда давление слишком высокое, может происходить нежелательная нуклеация частиц в газовой фазе. При обычных реактивных процессах материал источника пара (например, распыляемая мишень или горячей тигель, содержащий расплавленный наносимый материал) может вступать в нежелательную реакцию с рабочим газом.

Жидкие фазы также используются для нанесения тонкопленочных покрытий. Но качество полученных пленок, как правило, хуже, чем получают описанными выше способами из-за загрязнения примесями в жидком источнике. При плазменном или взрывном напылении покрытия состоят из застывших капель расплавленного металла или керамики; они гораздо толще и грубее, чем при осаждении из газовой фазы, и, следовательно, не рассматриваются как тонкие пленки.

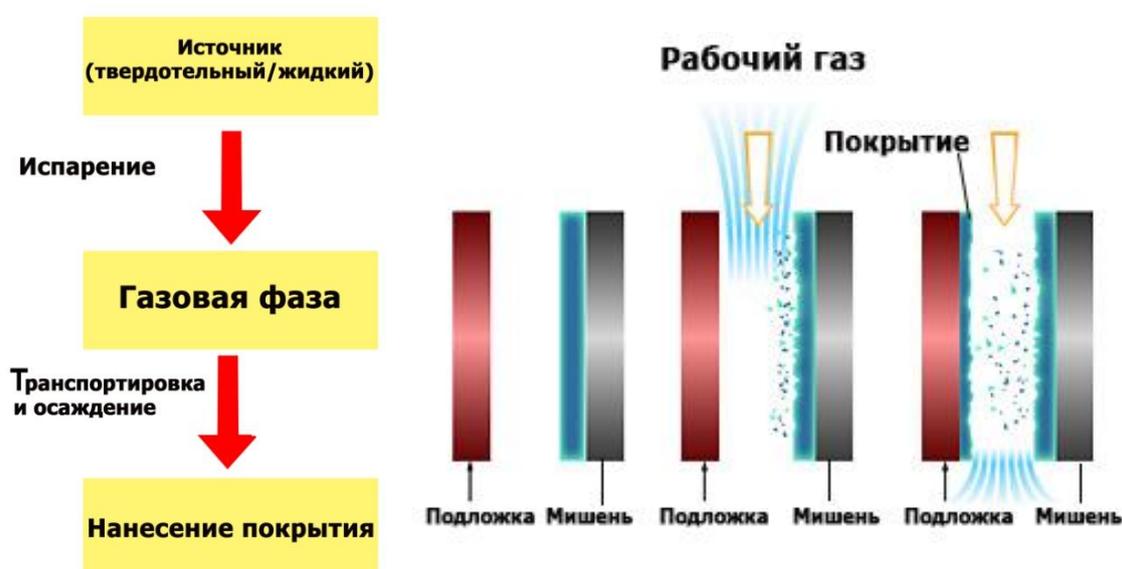


Рис. 2. Схема процесса конденсации с ионной бомбардировкой

С целью преодоления ограничений методов предлагается дополнительно использовать струю инертного газа для доставки молекул испаряемого металла к подложке. Этот способ может быть использован в вакуумных установках, оборудованных мощной системой откачки. В англоязычной литературе для похожих способов доставки материалов к подложке используются термины пароструйное или газоструйное осаждение (JVD). Метод используется для различных материалов при нанесении тонко и толстопленочных покрытий, толщины которых можно контролировать, а также и его стехиометрию, при высокой скорости. Он показывает хорошие результаты при нанесении покрытий из многокомпонентных материалов, отличается высокой скоростью, экономичностью и большим разнообразием используемых материалов.

Основным технологическим признаком метода пароструйного осаждения является наличие сверхзвуковой струи газа, которая доставляет атомы, молекулы или даже капли материала к подложке и обеспечивает их эффективное осаждение на небольшой площади подложки. Если требуется получить покрытие на больших площадях, то необходимо организовывать взаимное сканирование подложки и источника, чтобы обеспечить полное покрытие поверхности.

Важным обстоятельством является то, что осаждение происходит в экологически чистой среде, без применения токсичных веществ и катализаторов. Во время осаждения нет необходимости нагревать подложку, ее температура остаётся близкой к комнатной.

Источники материала, применяемые для метода пароструйного осаждения, могут иметь различные варианты конструкций, но все они монтируются на фланцах, присоединенных к камере, откачиваемой до низкого вакуума. Высокоскоростной поток газа, поступающий через источники в вакуумную камеру, откачивается механическими форвакуумными насосами или насосами Рутса, обеспечивающими скорости откачки порядка 5000...10000 литров в минуту.

В том случае, если требуется наносить многослойные покрытия, возможна комплектация установки несколькими источниками, заправленными различными материалами. В этом случае источники работают попеременно, и на подложках формируется многослойное покрытие.

Фактически метод пароструйного осаждения является комбинацией классических методов осаждения покрытий в вакууме с высокоэнергетической струей ионизированного газа, который является транспортом, целенаправленно доставляющим материал в направлении подложки.

Типовой источник пароструйного осаждения представляет собой цилиндрическую камеру диаметром 7,62 см (3 дюйма), с выходным соплом диаметром около 1 см. Гелий, аргон или азот подается внутрь источника и поступает в вакуумную камеру через сопло.[1]

Схема устройства источника пароструйного осаждения с термическим испарителем показана на рисунке 3.

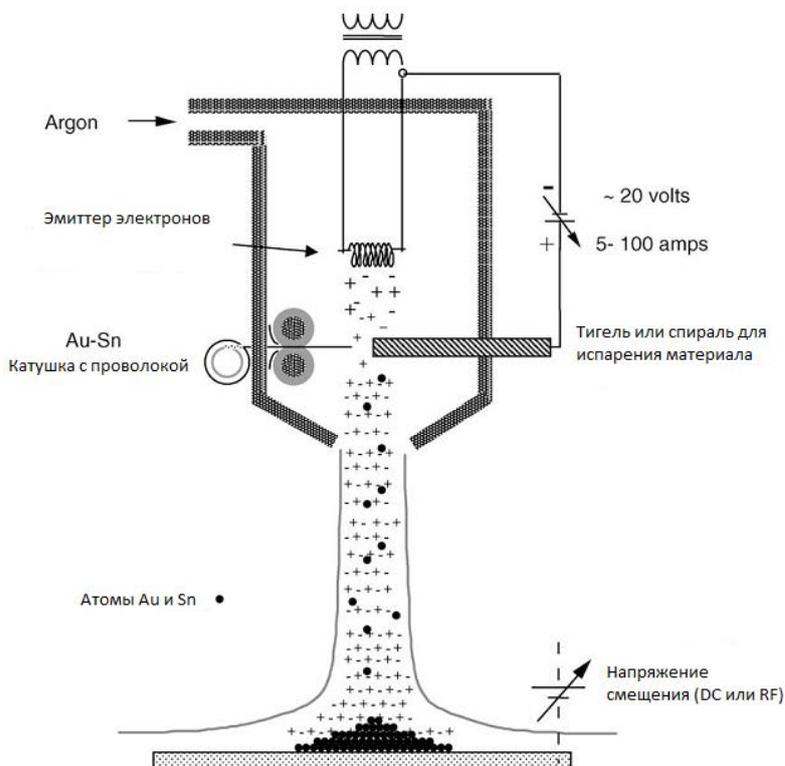


Рис. 3. Схема устройства источника пароструйного осаждения [1]

Обычно давление внутри источника равно нескольким торрам, а давление в камере составляет 1 торр или менее. Точное соотношение давлений зависит от наносимого материала и требуемых свойств покрытия.

Когда соотношение давлений превышает значение 2, величина потока газа достигает критического значения и скорость газа, проходящего через сопло, достигает скорости звука. Например, для гелия при температуре 298 К скорость струи составляет около 10^5 см/с.

Тонкая проволока материала непрерывно подается в зону, нагреваемую с помощью тигля или спирали, сделанной из вольфрама. При контакте проволоки с нагревателем она расплавляется, смачивает спираль и начинает испаряться. Испаряющиеся атомы материала увлекаются потоком газа в сторону сопла, проходят через него со сверхзвуковой скоростью и осаждаются на подложке в виде окружности диаметром около 1 см. Распределение материала в зоне осаждения подчиняется закону Гаусса.

Технология нанесения покрытий методом пароструйного осаждения

Технология нанесения покрытий методом пароструйного осаждения, реализованная на стенде для проведения испытаний(см.рис.4).

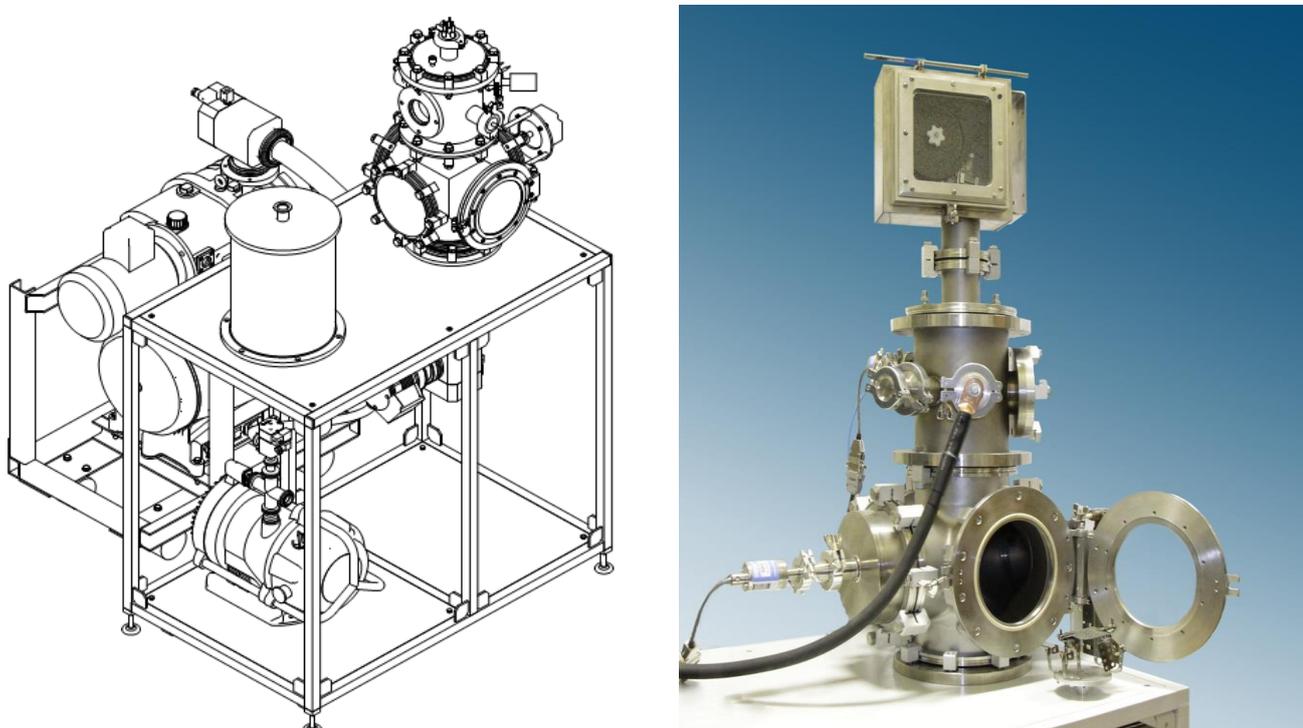


Рис. 4. Внешний вид стенда для проведения испытаний опытного образца источника пароструйного осаждения

В предыдущих сериях опытов, описанных в работе [1] были приведены следующие результаты адгезии методом отрыва.

Таблица 2. Сила отрыва (разрушения) в пересчете на 1 кв.мм, кгс.

№ платины				Характер разрушения
1	2	3	4	
	6,5	5,5	7,5	По покрытию
	6,5	4,0	4,0	
	4,5	7,0	7,5	
	6,0			
	6,0			
6,0		6,1	3,0	По керамике
6,0		8,0	3,5	

По результатам измерения адгезия пленок к подложке для всех представленных образцов составила более 7 МПа. При максимально возможной нагрузке, реализуемой прибором, разрушения пленки не произошло. При измерениях разрушился клеевой слой, которым грибок был приклеен в пленке.

Проведенные измерения позволяют говорить о высоких значениях адгезии и полном покрытии пленкой подложки при использовании для нанесения метода пароструйного осаждения.

После проведения патентного исследования, на наличие различных мер, повышающих адгезию тонкой пленки с подложкой нитрида алюминия, был обнаружен легко реализуемый способ, заключающийся в дополнительном подслое титана. Предлагаемый способ позволяет обеспечивать достижение технического результата, заключающегося в повышении прочности сцепления металла с керамикой, посредством предварительного напыления адгезионного подслоя титана. Выполнение операций в едином технологическом цикле снижает трудоемкость процесса металлизации и исключает необходимость такой операции, как спекание металлизационных слоев, а особенности процесса металлизации в совокупности исключают применение драгметаллов, что удешевляет изделия без ухудшения их электропараметров.[4]

Улучшенная технология нанесения тонкопленочного покрытия на подложку нитрида алюминия заключается в следующем:

1) Подготовка подложки к нанесению покрытия

Подготовка подложки к нанесению покрытия заключается в ее промывке в изопропиловом спирте. Промывка осуществляется при помощи ультразвуковой ванны «Водолей-1».

Подложка размещается в ультразвуковой ванне таким образом, чтобы обеспечить полное ее покрытие изопропиловым спиртом в процессе обработки.

Время обработки – 10 минут. После завершения обработки подложка высушивается при комнатной температуре.

Не допускается прикасаться к поверхностям подложки, на которые будет проводиться нанесение покрытия после операции подготовки подложки к нанесению покрытия.

2) Загрузка подложки в вакуумную камеру с дуговым испарителем для нанесения подслоя титана

Подложка устанавливается в вакуумную камеру на подложкодержатель при помощи специального зажима. Расстояние от подложки до дуги равно 130 мм.

3) Загрузка испаряемого материала в вакуумную камеру с дуговым испарителем

Устанавливается титановый испаритель. После загрузки подложки и титанового испарителя в вакуумную камеру закрыть дверь вакуумной камеры.

4) Откачка вакуумной камеры с дуговым испарителем

До начала процесса нанесения покрытия необходимо откачать вакуумную камеру до давления не выше 10^{-3} Па.

5) Включение системы дугового испарения

Включить систему дугового испарения. Подаваемое напряжение на испаритель равнялось 25 В. Время распыления продолжалось 1 минуту для нанесения Ti толщиной 300 нм.

6) Выключение системы дугового испарения

7) Отключение системы откачки вакуумной камеры с дуговым испарителем

8) Напуск атмосферы и выгрузка подложки из вакуумной камеры с дуговым испарителем

9) Загрузка подложки в вакуумную камеру для нанесения меди

Подложка устанавливается в вакуумную камеру на подложкодержатель при помощи специального зажима. Расстояние от сопла источника до подложкодержателя должно быть равно 15 мм.

После загрузки подложки в вакуумную камеру закрыть дверь вакуумной камеры.

10) Загрузка испаряемого материала

Катушка с испаряемым материалом устанавливается в камеру подачи материала. После загрузки проволоки закрыть дверь камеры подачи материала.

11) Откачка вакуумной камеры, источника и системы подачи материала

До начала процесса нанесения покрытия необходимо откачать вакуумную камеру, источник и камеру подачи материала до давления не выше 10^{-3} мбар.

12) Включение газовой системы и установка режима подачи газа

Включить систему подачи газа. Расход газа должен быть таким, чтобы обеспечить давление в источнике не ниже 20 мбар, давление к камере не выше 2 мбар. Чем больше перепад давлений между камерой и источником, тем больше будет плотность получаемого покрытия и его адгезия к подложке.

В ходе проведения экспериментов использовалась подача газа с расходом в 300 сссм. Давление в источнике при этом составило 27 мбар.

13) Включение испарителя и установка режимов испарения

Так как при термическом испарении основным параметром является мощность, подводимая к испарителю, то необходимо использовать режим постоянной мощности.

Нанесение покрытий меди проводилось при мощности 750 Вт.

14) Включение системы подачи испаряемого материала

Включение системы подачи испаряемого материала заключается в установке скорости подачи и подаче питания на двигатель.

При нанесении покрытий использовалась подача материала со скоростью 0,3 оборота в минуту.

15) Нанесение покрытия

В случае относительного взаимного сканирования источника и подложки время нанесения покрытия на всей поверхности подложки слоем материала толщиной h мкм будет определяться как

$$t_o = h \cdot t_o \cdot S_{\text{подл}} / S_{\text{пятна}}$$

где h – требуемая толщина покрытия в мкм; t_o – время осаждения покрытия толщиной 1 мкм на запыляемом пятне без сканирования источника относительно подложки, $S_{\text{подл}}$ – площадь подложки, $S_{\text{пятна}}$ – площадь запыляемого пятна при неподвижном источнике.

Время распыления продолжалось 1 минуту для нанесения Cu толщиной 1 мкм.

*16) Выключение испарителя и системы подачи испаряемого материала**17) Выключение газовой системы**18) Отключение системы откачки*

Отключение системы откачки необходимо производить не ранее, чем через 5 минут после отключения испарителя, чтобы избежать его окисления, охрупчивания и разрушения.

*19) Напуск атмосферы и выгрузка подложки из вакуумной камеры**20) Гальваническое наращивание меди.*

Гальваническое наращивание металла на поверхность основано на процессе электролиза. В ванну с раствором электролита поместили подложку после процесса металлизации и пластину из меди. При прохождении тока через электролит положительно заряженные ионы пластины из меди движутся к катоду и ровным слоем осаждаются на подложке толщиной 60 мкм.

Исследование образов покрытий, полученных методом пароструйного осаждения с подслоем из титана

В ходе выполнения работы исследованию были подвергнуты контрольные образцы керамики с металлизацией медью, выполненной методом пароструйного осаждения, и титановым подслоем, выполненной методом дугового испарения, по измерении адгезии методом отрыва.

Методика определения адгезии заключается в следующем. «Грибок» с площадью шляпки 1 мм^2 (см.рис.5) припаивается на покрытие. Адгезиметр оснащен пружинным устройством, прилагающим отрывное усилие к «грибку». При отрыве «грибка» от поверхности, индикатор на шкале показывает численную величину адгезии, выраженной в силе, требуемой для отрыва грибка. Для получения приблизительной величины в кг/см^2 необходимо увеличить величину в Н/мм^2 в 10 раз.

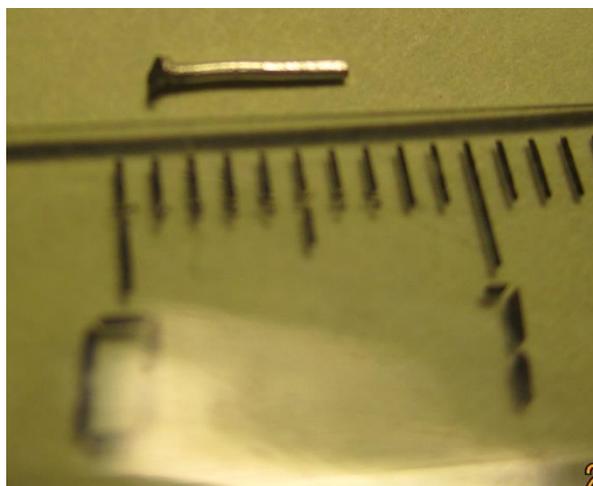


Рис. 5. Внешний вид «грибка»

В таблице 3 представлены результаты опыта.

Таблица 3. Сила отрыва (разрушения) в пересчете на 1 кв.мм, кгс.

Номер точки измерения	1	2	3	4	5	6	7	8
	5	6	7	7	7	8	7	8

По результатам измерения адгезия пленок к подложке для всех точек измерений составила более 8 МПа. При максимально возможной нагрузке, реализуемой прибором, разрушения пленки не произошло, т.к. при этом усилие соскочил зажим с «грибка» (см.рис.6).

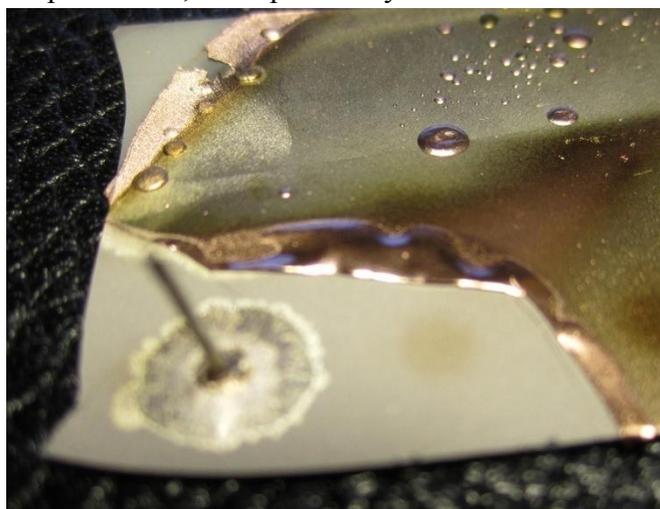


Рис. 6. «Грибок», который не оторвался при максимальной нагрузке 8 кв.мм, кгс.

На других «грибках» происходил отрыв по керамике, что подтверждает высокое значение адгезии металлических слоев к поверхности образца.

Проведенные измерения позволяют говорить о высоких значениях адгезии и улучшение этих результатов с использование подслоя из титана при использовании для нанесения меди метода пароструйного осаждения.

Литература

1. *Баданова Н.В., Колесник Л. Л.* Способ металлизации керамических подложек. [Электронный ресурс] // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2014: Машиностроительные технологии». – М.: МГТУ им. Н.Э Баумана.
2. US. Patent 5356673–Evaporation system and method for gas jet deposition of thin film materials, 1994
3. *Непочатов Ю., Земницкая А., Муль П.* Разработка керамики на основе нитрида алюминия для изделий электронной техники. // Современная электроника.-2011,- №9.
4. RU. Патент № 2044719 – Способ металлизации заготовок пьезокерамических элементов, 2014

УДК 621.3

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК

Игорь Владимирович Байбаков⁽¹⁾, Чжо Мьинт У⁽²⁾

Студент 6 курса⁽¹⁾, магистр 3 года⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Л.Л. Колесник

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Пароструйное осаждение, называемое в англоязычной литературе Jet Vapor Deposition (JVD) – метод, использующий высокоскоростную струю инертного газа для доставки компонентов пленки к подложке. По своей сути метод является разновидностью метода термического испарения, при котором процесс формирования покрытия сопровождается процессом ассистирования струей рабочего газа.

Метод первоначально был разработан американской фирмой Jet Process Corporation и по литературным данным в настоящее время внедрен в коммерческое применение. Пароструйное осаждение используется для различных материалов при нанесении тонко и толсто пленочных покрытий. Он показывает хорошие результаты при нанесении покрытий из многокомпонентных материалов, отличается высокой скоростью и экономичностью [1].

Типовой источник пароструйного осаждения предоставляет собой цилиндрическую камеру диаметром 7,62 см (3 дюйма), с выходным соплом диаметром около 1 см. Гелий, аргон или азот подается внутрь источника и поступает в вакуумную камеру через сопло.

Схема устройства источника пароструйного осаждения с термическим испарителем показана на рисунке 1 [2].

Обычно давление внутри источника равно нескольким торрам, а давление в камере составляет 1 торр или менее. Точное соотношение давлений зависит от наносимого материала и требуемых свойств покрытия.

Когда соотношение давлений превышает значение 2, величина потока газа достигает критического значения и скорость газа, проходящего через сопло, достигает скорости звука. Например для гелия при температуре 298 К скорость струи составляет около 105 см/с [1].

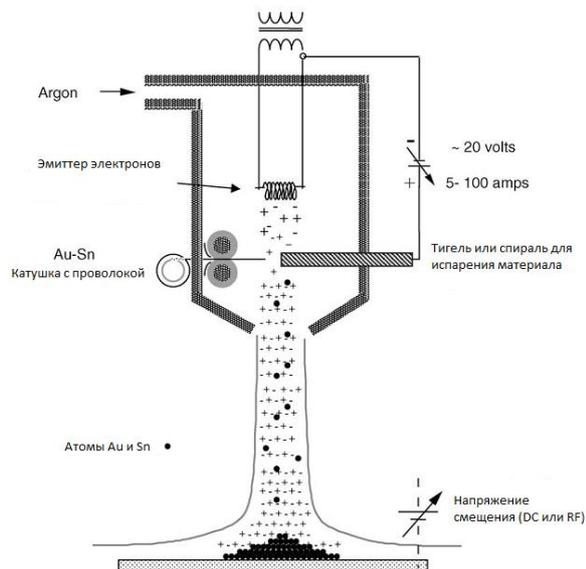


Рис. 1. Схема устройства источника пароструйного осаждения (JVD)

Тонкая проволока материала непрерывно подается в зону, нагреваемую с помощью тигля или спирали, сделанной из вольфрама. При контакте проволоки с нагревателем она расплавляется, смачивает спираль и начинает испаряться. Испаряющиеся атомы материала увлекаются потоком газа в сторону сопла, проходят через него со сверхзвуковой скоростью и осаждаются на подложке в виде окружности диаметром около 1 см. Распределение материала в зоне осаждения подчиняется закону Гаусса.

Отработка технологии пароструйного осаждения проводилась на установке, расположенной в лаборатории кафедры электронных технологий в машиностроении в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Испарение производится с помощью электрического нагревателя, выполненного из тугоплавкого материала. Источник настроен на использование исходного материала, подаваемого в зону нагрева в виде проволоки. Подача проволоки в зону испарения осуществляется непрерывно, что обеспечивает продолжительную работу источника без необходимости перезарядки испарителя.

Доставка молекул испаряемого материала к подложке осуществляется с помощью сверхзвуковой струи рабочего газа-носителя, что обеспечивает высокую скорость осаждения и максимальный коэффициент использования наносимого материала.

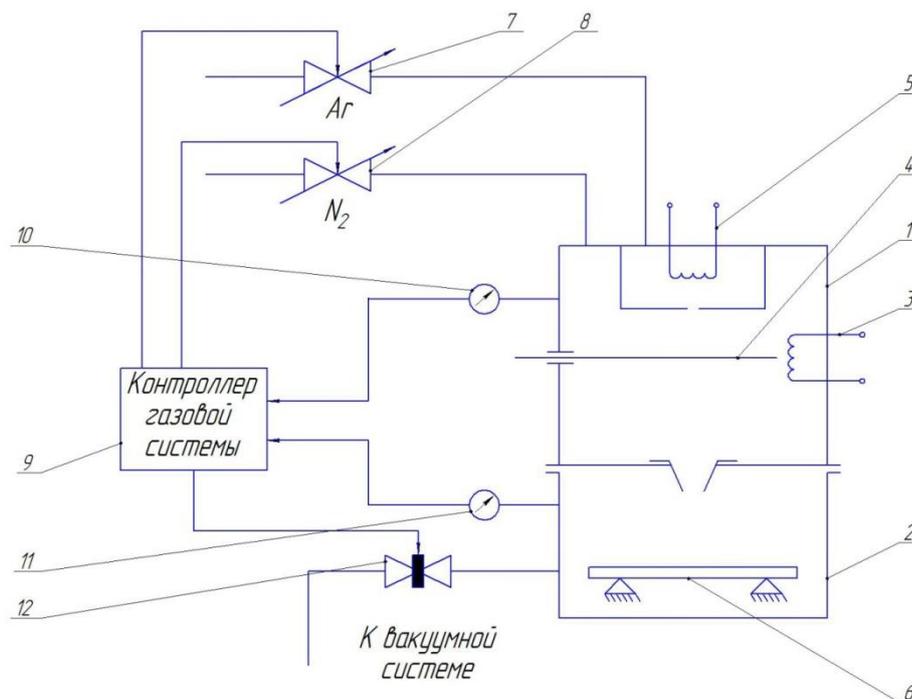
В источнике предусмотрено устройство зажигания разряда для ионизации потока рабочего газа.

Устройство подачи испаряемого материала оснащено шаговым двигателем, что позволяет плавно регулировать скорость подачи проволоки в зону испарения.

Схема управления системой подачи газа и регулирования давления приведена на рисунке 2.

Принцип работы системы подачи газа и регулирования давления заключается в следующем.

Технологический источник установлен на вакуумной камере, в которой располагается подложка. Благодаря наличию перегородки, в которой установлено сопло, вакуумная камера и источник разделены на два условно независимых объема. Откачка вакуумной камеры ведется через диафрагмирующий клапан-бабочку. Откачка источника ведется только через небольшое по диаметру сопло, которое соединяет полость источника с вакуумной камерой. Такое разделение обеспечивает перепад давлений между камерой и источником, необходимый для возникновения реактивной струи рабочего газа, движущейся со сверхзвуковой скоростью.



1 – технологический источник, 2 – вакуумная камера, 3 – спираль испарителя, 4 – испаряемый материал, 5 – спираль ионизатора, 6 – подложка, 7 – регулятор расхода рабочего газа (аргон), 8 – регулятор расхода рабочего газа (азот), 9 – контроллер газовой системы, 10 – датчик давления в технологическом источнике, 11 – датчик давления в вакуумной камере, 12 – диафрагмирующий клапан

Рис. 2. Схема системы подачи газа и регулирования давления

Рабочий газ подается в источник через два независимых канала с использованием регуляторов расхода газа. Аргон подается в зону эмиттера электронов через регулятор расхода, а азот подается непосредственно в источник через регулятор расхода.

Давление в источнике и в камере контролируется с помощью емкостных датчиков.

Контроллер газовой системы получает давления от обоих датчиков. Анализируя сигнал с датчика, установленного в вакуумной камере, контроллер открывает диафрагмирующий клапан таким образом, чтобы обеспечить требуемое давление в вакуумной камере. Одновременно контроллер анализирует сигнал с датчика, установленного в источнике, и выставляет поток подаваемого газа в величину, необходимую для поддержания заданного давления в источнике.

Независимая регулировка скорости откачки вакуумной камеры и потока подаваемого газа в источник позволит обеспечить требуемый перепад давлений между камерой и источником.

Задачами проводимых исследований были:

1. Определение оптимального значения подачи газа, при котором возникает наибольший перепад давлений в камере и источнике, так как от перепада давлений в системе источник-камера зависит длина струи, движущейся со сверхзвуковой скоростью..

2. Разработка конструкции испарителя и определение параметров, при которых происходит гарантированное испарение подаваемой меди.

Был проведен ряд опытов, анализ которых позволил выбрать параметры, при которых длина сверхзвуковой струи будет максимальна. Известна зависимость для расчета длины сверхзвуковой струи, истекающей в вакуум:

$$L = 0,67d \sqrt{\frac{P_1}{P_2}}$$

где L – длина струи (мм), d – диаметр сопла (мм), P_1 – давление в первой камере, P_2 – давление во второй камере.

В экспериментах первой камерой выступал источник, второй камерой собственно вакуумная камера.

Экспериментальным путем было выяснено, что при напуске газа в камеру источника происходит увеличение отношения давлений, хоть и давления в обеих камерах увеличивается.

Данный эксперимент был проведен с малым соплом диаметра 2 мм и без сопла, диаметр отверстия – 12 мм. Напускаемый газ – аргон. Скорость откачки во время проведения эксперимента составляла

Результаты измерений перепада давления и рассчитанной длины сверхзвуковой струи для разных диаметров сопла представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения давлений для различных диаметров сопел и потоков газа

Поток газа, ст. см ³ /мин	Давление в камере источника P_1 , мбар		Давление в камере подложки P_2 , мбар		Отношение давлений P_1/P_2		Диск маха L , мм	
	Ø2	Ø12	Ø2	Ø12	Ø2	Ø12	Ø2	Ø12
0	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	41,4	1,89	8,62	11,05
25	1,1	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	57,8	3,36	11,88	14,74
40	1,4	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	82,3	3,11	12,16	14,18
50	1,5	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	79	3,21	11,91	14,40
100	2	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	66,7	3,33	10,94	14,67
150	2,3	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	57,5	3,33	10,16	14,67
200	2,5	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	54,3	3,7	9,88	15,47
250	2,6	$2 \cdot 10^{-1}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	48,1	3,7	9,30	15,47
300	2,8	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	43,75	3,8	8,86	15,67
350	3	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	41,7	3,8	8,65	15,67
400	3	$3 \cdot 10^{-1}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$	37	3,79	8,15	15,65
450	3,1	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{-2}$	34,8	3,75	7,91	15,57
500	3,2	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$9,4 \cdot 10^{-2}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	34	3,8	7,82	15,67
550	3,2	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	32	3,8	7,58	15,67
600	3,3	$4,1 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	30	3,72	7,34	15,51

График зависимости длины струи от объема подаваемого газа для разных сопел представлен на рисунке.

Очевидно, что для обоих диаметров сопел имеется максимум – предельное значение количества подаваемого газа, после которого длина струи явно уменьшается.

Для сопла диаметром 2 мм максимальная расчетная длина струи составляет 11,91 мм при потоке газа 50 ссст. Для сопла диаметром 12 мм явного максимума не наблюдалось, однако существует диапазон значений от 200 до 600 ссст, при которых расчетная длина струи практически неизменна и составляет около 15,5 мм.

В результате эксперимента мы получаем, что при использовании малого сопла с диаметром 2 мм разница давлений в камерах существенно выше, чем при использовании сопла диаметра 12 мм. За счет большего диаметра сопла диск Маха при этом получается больше, чем при использовании малого сопла.

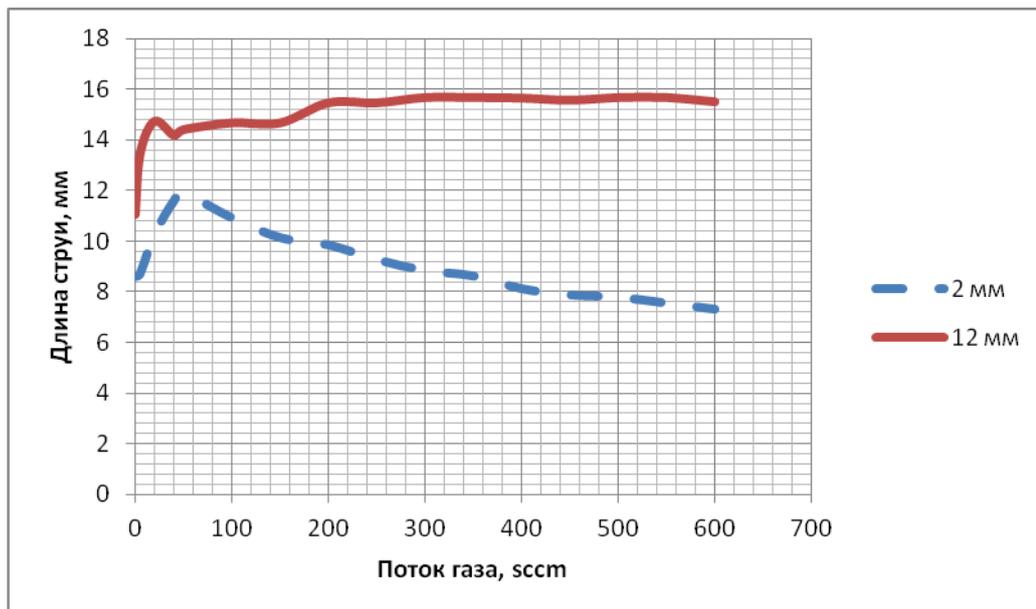


Рис. 3. Зависимость длины струи от объема подаваемого газа

Так как по литературным данным диаметр пятна получаемого сопоставим с диаметром сопла, дальнейшие эксперименты по нанесению покрытия проводились с соплом диаметром 12 мм.

Второй задачей являлась разработка конструкции испарителя для продолжительной работы без необходимости его замены.

При работе термических испарителей из-за взаимодействия расплавленного материала с материалом испарителя постепенно происходит разрушение последнего. Для предотвращения этого обычно используются защитные конструкции из керамики, как правило, оксида циркония.

Наиболее доступным вариантом является использование керамических трубок. Но использование трубок требует изменение конструкции и перехода от спиральных испарителей к испарителям, выполненным в виде стержней.

Установленные токовводы и источник питания не позволяют использовать силы тока более 200 А. Поэтому для разработки конструкции испарителя была проведена серия экспериментов для определения оптимального количества вольфрамовых стержней, используемых для испарения материала.

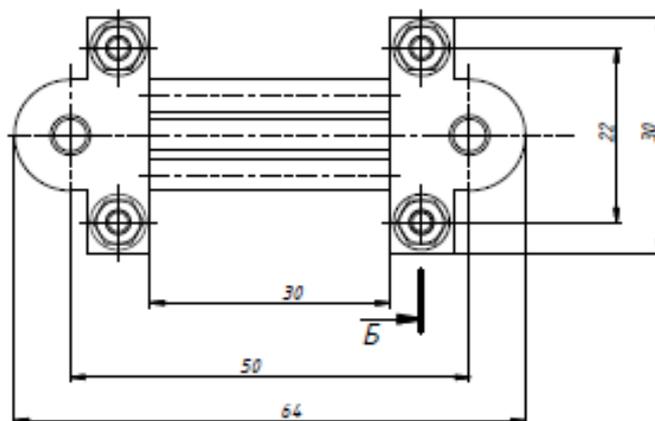


Рис. 4. Конструкция испарителя с защитой из керамических трубок

Были зафиксированы установки (мощность, сила тока), при которых медь испаряется при использовании вольфрамовой спирали, а также оптимальное количество вольфрамовых стержней, чтобы рабочий ток не превышал 200vA.

На основе данных, полученных в ходе опытов, был спроектирован и изготовлен новый испаритель с керамической оснасткой для испарения титана и проведена серия опытов по нанесению меди и титана.

Конструкция разработанного испарителя представлена на рисунке.

Новый испаритель представляет собой три вольфрамовых стержня с оснасткой из оксида циркония. Стержни закрепляются между двух медных пластин винтами.

Были проведены опыты с изготовленным новым испарителем. Медь начала плавиться при мощности $P=300$ Вт, ток испарителя составил 200 А.

Внешний вид полученного покрытия меди на подложке оксида алюминия представлен на рисунке.



Рис. 5. Внешний вид полученного покрытия меди на подложке оксида алюминия

Литература

1. Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology / ed. by P.M.Martin. - 3rd ed. – Burlington; Oxford: William Andrew / Elsevier, 2010. – xviii, 912 p.: ill. – Bibliogr. at the end of the chapters. – Ind.: p.902-912. – ISBN 978-0-8155-2031-3
2. US. Patent 5571332 – Electron Jet Vapor Deposition System, 1996

УДК 621.793.182, 621.893

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК

Никита Михайлович Барсуков⁽¹⁾, Василий Владимирович Петров⁽²⁾

Студент 4 курса⁽¹⁾, ассистент кафедры⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: А.И. Беликов

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире тонкие пленки используются во многих областях науки и техники. В сфере режущего инструмента актуальны вопросы, связанные с повышением качества и скорости обработки, снижением временных издержек и затрат на инструмент. Один из путей решения обозначенных проблем – использование упрочняющих покрытий на основе твердых и нанокompозитных тонких пленок. Нанокompозитные тонкопленочные покрытия, содержащие в

своем составе твердые и твердосмазочные материалы, представляют практический интерес благодаря повышенным трибологическим характеристикам, которыми обладают. Снижение трения и адгезионного взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом способствует повышению качества металлообработки, снижает производственные затраты. Одним из способов снижения коэффициента трения покрытия является добавление дисульфида молибдена в состав покрытий.

Дисульфид молибдена – неорганическое бинарное химическое соединение четырехвалентного молибдена с двухвалентной серой. Химическая формула – MoS_2 . Вследствие слоистой, анизотропной структуры с низким усилием связи между плоскостями, дисульфид молибдена обладает выдающимися антифрикционными свойствами. Современные твердые упрочняющие покрытия на основе соединений титана (например, TiSiBN , TiBN , TiAlN и т.п.) низкими трибологическими характеристиками, коэффициент трения скольжения по стали достигает значений порядка 0.6-0.8. Использование в составе многослойных и нанокompозитных покрытий дисульфида молибдена обеспечивает существенное повышение трибологических характеристик.

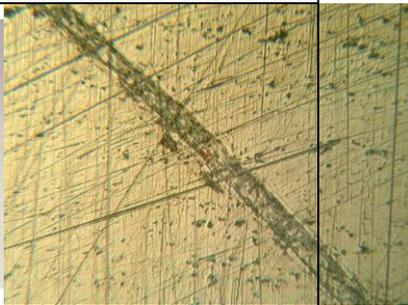
В трибологическом контакте пары трения или инструмента с обрабатываемой поверхностью в твердых упрочняющих покрытиях возникают высокие локальные контактные напряжения и сдвиговые напряжения, увеличивающиеся с повышением коэффициентом трения. Рассматриваемые эффекты особенно проявляются на начальной стадии процесса, которая характеризуется как этап приработки, и способствуют снижению износостойкости покрытия. Для решения этой проблемы используют мягкие притирочные покрытия, наносимые поверх твердых пленок, уменьшающие негативный эффект «жесткой» приработки.

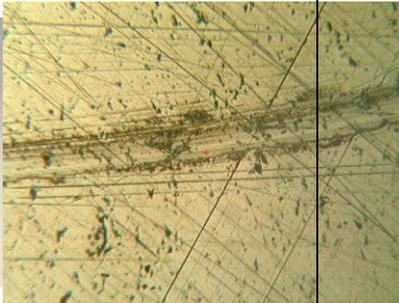
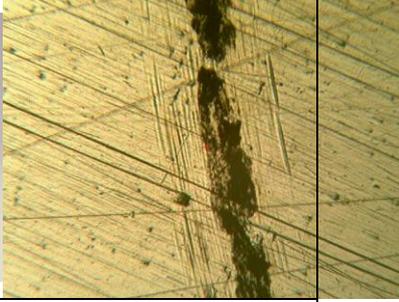
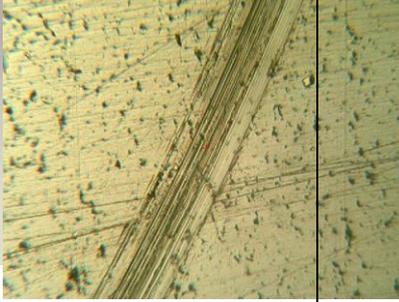
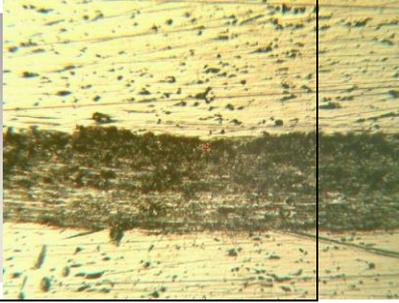
Тонкопленочные покрытия дисульфида молибдена обеспечивают коэффициент трения скольжения по стали на уровне значений 0.1 и менее при высоких контактных нагрузках и работоспособны до относительно высоких температур (400-500°C). В этой связи, практический интерес представляет использование дисульфида молибдена в упрочняющих покрытиях, в том числе, и в качестве притирочного слоя. Покрытие дисульфида молибдена может быть нанесено поверх твердого покрытия на поверхности технологического инструмента: сверл, режущих дисков, твердосплавных пластин и т.д.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для оценки степени влияния притирочного слоя MoS_2 на трибологические характеристики некоторых покрытий, на кафедре МТ11 МГТУ имени Н.Э.Баумана были подготовлены и проведены следующие эксперименты. На поверхность сверл и плоские металлические подложки методом магнетронного распыления наносились следующие покрытия (таблица 1). Плоские подложки использовались для измерения трибологических характеристик покрытий на стенде, схема которого представлена на рисунке 1.

Таблица 1. Экспериментальные образцы с покрытиями и вид дорожек трения на подложках после испытаний на трибометрическом стенде.

Номер образца	Покрытие	Образцы сверл и подложек	Внешний вид дорожки трения на подложках
1	TiCN		

2	TiCN+MoS ₂		
3	HfZrN		
4	HfZrN+ MoS ₂		
5	TiMoS ₂ Al		

Исследования проводились на трибометрическом стенде в лаборатории кафедры МТ11 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Схема стенда представлена на рисунке 1. В стенде реализована известная схема измерения "Pin-On-Disk", широко используемая в современных трибометрах. На опоре, в подшипниковом узле стенда размещается коромысло 5, в левом плече которого размещается тензобалка 4 с закрепленным на ее конце индентором 3 (pin). В основании индентора крепится контртело, приводимое в контакт с поверхностью исследуемого образца. В экспериментах для этих целей использовался шарик из стали ШХ15. К правому плечу коромысла 5 посредством троса через блок 6 прикладывается усилие от груза 7, создающего необходимое контактное взаимодействие в паре трения «контртело»-«образец». На правом плече коромысла также имеется система регулировочных грузов для балансировки системы в ненагруженном состоянии. Предметный столик 1 с расположенным на нем исследуемым образцом 2 приводится во вращение асинхронным двигателем с регулятором частоты.

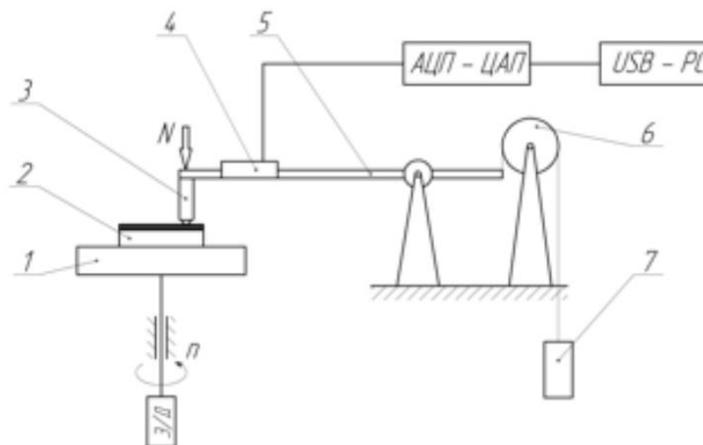


Рис. 1. Схема трибометрического стенда

1 – предметный столик; 2 – исследуемый образец; 3 – индентор; 4 – тензобалка; 5 – коромысло; 6 – блок; 7 – груз.

По результатам измерений, средние значения коэффициента трения на этапах функционирования отдельных слоев покрытия в процессе трибометрических испытаний, были сведены в таблицу 2. Износостойкость покрытия оценивалась по времени его истирания.

Таблица 2. Результаты измерений коэффициента трения и износостойкости покрытий.

Номер образца	Покрытие	Коэффициент трения		Время истирания, с	
		Твердый слой	Твердосмазочный слой	Твердый слой	Твердосмазочный слой
#2	TiMoS ₂ Al	0,425	-	150	-
#3	TiMoS ₂ Al	0,107	-	4600	-
#12	TiBN	0,325	-	100	-
#8	TiBN + MoS ₂	0,19	0,135	350	75
#9	TiCN	0,2	-	5250	-
#10	TiCN + MoS ₂	0,212	0,125	5950	75
#5	HfZrN	0,13	-	4700	-
#13	HfZrN + MoS ₂	0,175	0,052	5400	60
#0	Подложка	0,625	-	-	-

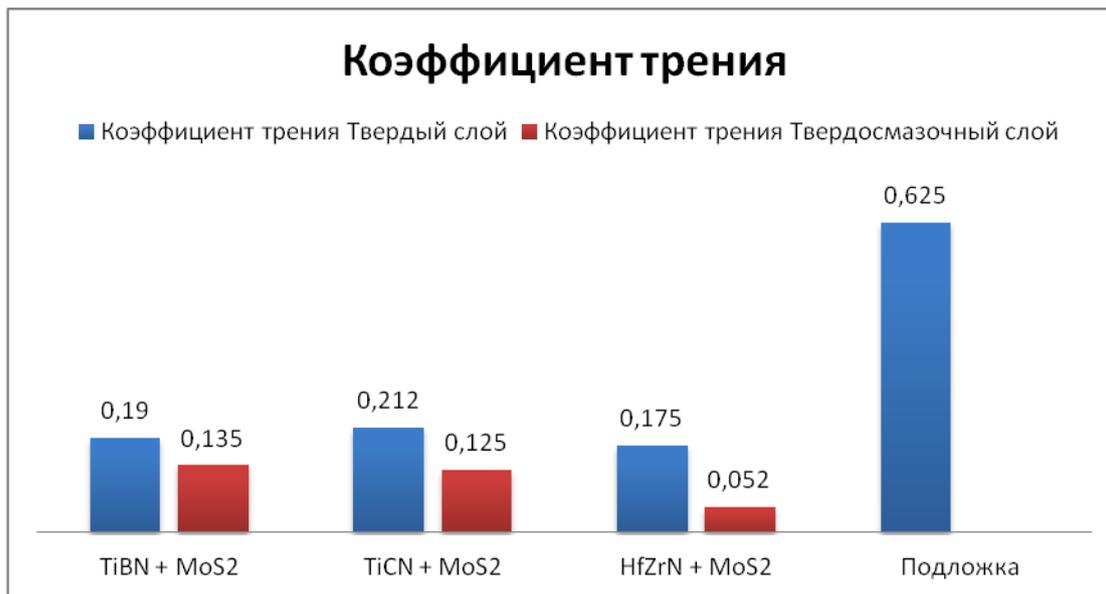


Рис. 2. Гистограмма и значения коэффициентов трения для полученных образцов.

ВЫВОДЫ

Опираясь на полученные в ходе выполнения работы результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Добавление верхнего слоя MoS₂ во всех случаях способствует существенному снижению трения на начальной стадии функционирования твердых покрытий. Для твердого покрытия HfZrN эффект снижения трения является наиболее существенным.
2. Покрытия HfZrN+MoS₂ и TiCN+MoS₂ обладают наилучшими трибологическими характеристиками и могут быть использованы при металлообработке без использования смазывающе-охлаждающих жидкостей.

Литература

1. Беликов А.И., Шаранков М.А., Селезнев А.В.. Исследование антифрикционных свойств многослойных тонкопленочных композиций на основе MoN, TiCN и MoS₂ // Высокие технологии в промышленности России: Материалы XV Международной научно-технической конференции. – М., 2009 - С.419-422.
2. Sam Zhang, Nasar Ali – Nanocomposite thin films and coatings., 2007 by Imperial College Press.
3. Григорьев С. Н., Табаков В. П., Волосова М. А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента/ <http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2012/Grigorjev.pdf>
4. Peter M. Martin. –Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. Science, Application and Technology. Second Edition – United States: Elsevier Inc., 2005. – 911 с.
5. Беликов А.И., Шаранков М.А., Хабинская Е.И. Исследование механических и трибологических свойств тонкопленочных структур на основе слоев MoN, TiCN и MoS₂ // Высокие технологии в промышленности России: Материалы XIV Международной научно-технической конференции. – М., 2008 – С.474-477.

УДК 53.03**ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК НА ОПАЛОВОМ ПОДСЛОЕ МЕТОДАМИ ТУННЕЛЬНОЙ И АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

Елена Владимировна Вагулина

Студентка 5 курса

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Е.В. Панфилова

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

Использование сканирующей туннельной микроскопии и атомно-силовой микроскопии позволяет изучить топологию поверхности и электрофизические свойства опаловых структур, формируемых для применения в микро- и нанoeлектронике.

Интерес к эмиссионным характеристикам опаловых структур вызван особенностью строения их поверхности. Опаловая матрица представляет собой плотноупакованные глобулы диоксида кремния (SiO_2) – кремнезема, с диаметром 100...1000 нм, образующие трехмерную решетку. Выявлено, что при нанесении на поверхность тонкой пленки, имеющей структуру опаловой матрицы, тонких пленок металла нанометровой толщины (до 100 нм) рост таких пленок происходит преимущественно на вершинах глобул, при этом на поверхности синтетического опала образуется сеть островков осаждаемого металла [1]. Функциональные характеристики тонкопленочных структур зависят от правильного выбора метода нанесения, технологических режимов и параметров оборудования.

Если в качестве металла использовать, например, Au, являющийся катализатором для роста углеродных нанотрубок, то при последующем осаждении на сформированную структуру углерода рост углеродных нанотрубок будет происходить упорядоченно в соответствии с топологией поверхности опала. Более того, наносферы могут способствовать увеличению тока автоэмиссии вследствие увеличения отношения длины к диаметру автоэммитера. Исследование образцов, изготовленных по описанной выше технологии обнаружило низкие пороговые значения эмиссии (3 В/мкм) и высокие токи (8 мкА/мм²) [2].

Также известно, что наличие тонких диэлектрических слоев на поверхности металла в некоторых случаях существенно снижает эффективную работу выхода такой системы и увеличивает ее эмиссионные свойства. По некоторым оценкам снижение работы выхода можно ожидать вплоть до толщин диэлектрического слоя $\sim 2000 \text{ \AA}$ [3]. Т.е. система металл-диэлектрик может обладать существенно отличными электронными свойствами от свойств материалов ее образующих.

Вышесказанное обуславливает интерес к изучению туннельных вольт-амперных (I-U) характеристик наноструктур, одним из слоев которых является слой диоксида кремния (кремнезема) со структурой опаловой матрицы. Наиболее информативным методом исследования в данном случае является метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), который позволяет исследовать как электрофизические свойства образцов, так и их топологию. Причем, анализ получаемых в режиме постоянного тока изображений может быть инструментом изучения эмиссионных процессов, возможно имеющих место на исследуемой поверхности, поскольку ее рельеф будет зависеть от туннельного напряжения, создаваемого в зазоре.

Подготовка образцов

Для выявления принципиальной возможности исследования подобных структур на имеющемся аналитическом оборудовании были подготовлены образцы, представляющие собой трехслойную тонкопленочную структуру, сформированную на скрайбированной керамической подложке (рис.1).

Проводящий слой был сформирован из Cr (Cr-Cu) с толщиной пленки 1 мкм, на поверхность которой были нанесены пленки кремнезема со структурой опаловой матрицы различной толщины. Опаловые пленки наносились методом вертикального вытягивания из коллоидного раствора кремнезема. Нанесение пленок золота на поверхность образцов производилось методом магнетронного распыления.

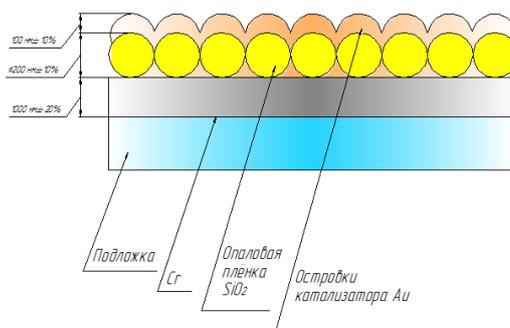


Рис. 1. Образец опаловой наноструктуры

Исследование образцов в СЗМ Solver Next

Сканирующий зондовый микроскоп Solver Next обеспечивает возможность измерений в режиме атомно-силовой и туннельной микроскопии, имеет минимальный шаг сканирования в плоскости образца 0,3 мкм. В соответствии с технической документацией, разрешение составляет 0,3 нм.

Сканирование в режиме СТМ образцов пленок опала

Сканирование оказалось возможным при условии небольшой толщины пленки опала, составляющей один- три глобулярных слоя.

Исследование осуществлялось по методу постоянного тока в топографическом режиме.

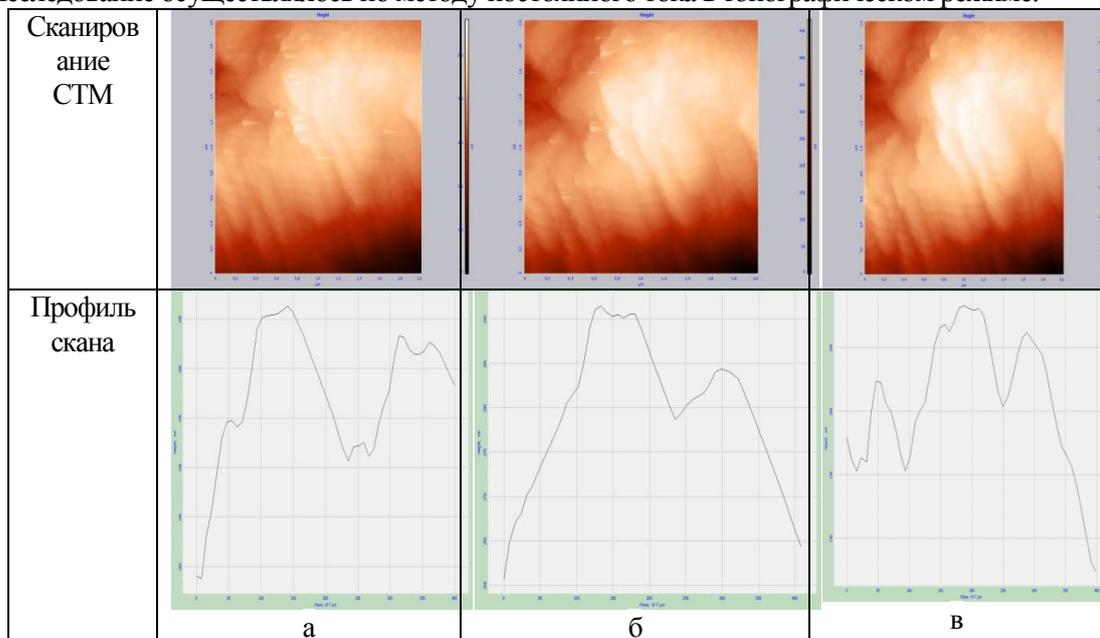


Рис. 2. СТМ-изображения поверхности образца, полученные при исследовании образцов на СЗМ Solver Next: а-при напряжении 0,1В;б-при напряжении 0,5 В; в-при напряжении 1В

Сканирование в режиме АСМ образцов пленок опала с золотом

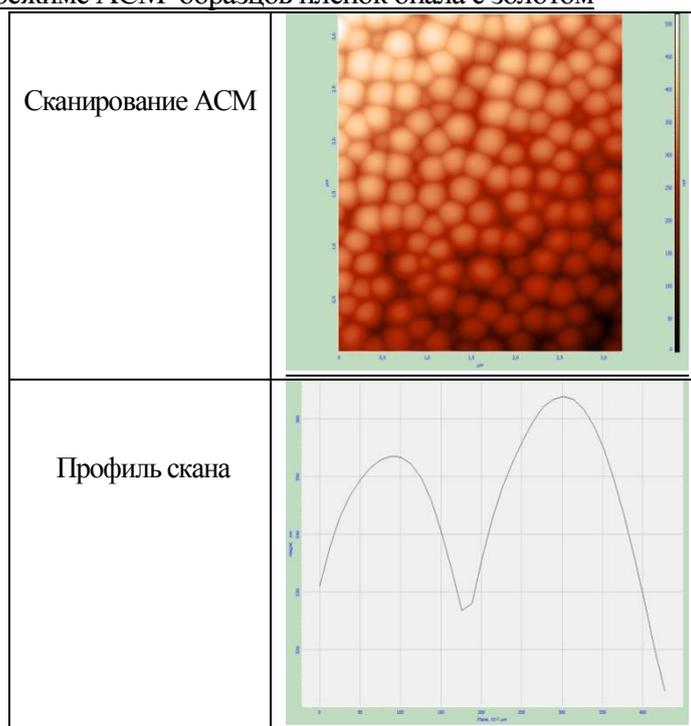


Рис. 3. АСМ- изображение поверхности образца, полученное при исследовании образцов на СЗМ Solver Next

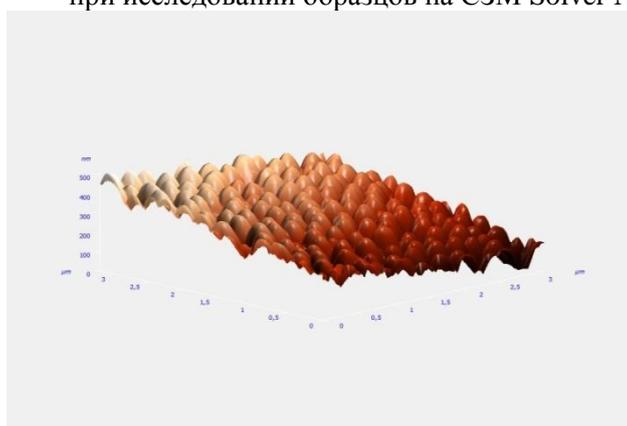


Рис. 4. 3D-изображение структуры образца на СЗМ Solver Next в АСМ-режиме

Сопоставление профилей образцов позволило определить корреляцию высоты рельефа с ростом пленки Au на поверхности опаловой матрицы (рис. 5).

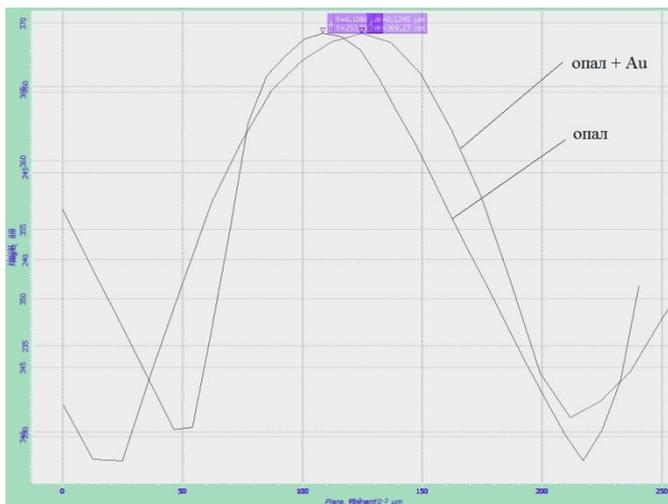


Рис. 5. Сопоставление профилей образцов, полученных в СТМ и АСМ-режимах

Сравнение шероховатости поверхностей образцов пленок опала и образцов пленок опала с золотом показало, что средняя шероховатость R_a равна 63,11 нм и 67,65 нм соответственно. Следовательно, средняя высота неровностей пленки золота составляет 4,54 нм.

Сравнение ВАХ образцов с проводящим слоем Cr и Cu

Формирование и исследование образцов с проводящим слоем Cu

Для сравнения вольт- амперных характеристик образцов с проводящим слоем Cu были подготовлены образцы представляющие собой трехслойную тонкопленочную структуру, сформированную на стеклянной подложке (рис. 6). В качестве буферного слоя использовался хром Cr с толщиной пленки 1 мкм, проводящий слой был сформирован из меди Cu с толщиной пленки 1 мкм, на поверхность которой были нанесены пленки кремнезема со структурой опаловой матрицы различной толщины. Опаловые пленки наносились методом вертикального вытягивания из коллоидного раствора кремнезема.

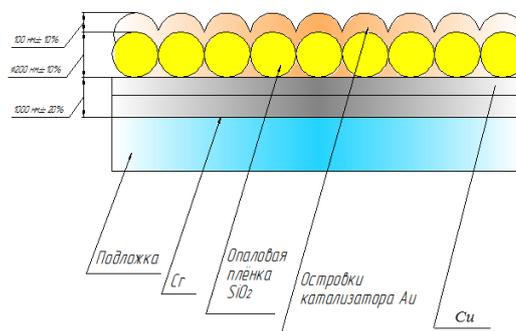


Рис. 6. Образец опаловой наноструктуры

Исследование осуществлялось в атмосферных условиях с помощью нанотехнологического комплекса УМКА-02 (изготовитель – Институт нанотехнологий, г. Москва) (рис. 7) .

Комплекс УМКА-02 имеет шаг сканирования в плоскости образца - 0,008 нм и шаг измерения по вертикали – 0,02 нм. В соответствии с технической документацией, конструкция комплекса должна обеспечивать возможность исследований биологических и слабо проводящих объектов без дополнительных технологических операций (запыление металлом и т.п.) с атомарным и молекулярным разрешением. Получение приемлемого качества изображения удалось достигнуть за счет применения дополнительных мер виброзащиты.



Рис. 7. Размещение образца в нанотехнологическом комплексе УМКА-02

Исследование рельефа осуществлялось по методу постоянного тока в топографическом режиме. На рис. 8 представлено изображение наночастиц, формирующих глобулу опаловой матрицы. а на рис.9 – туннельная вольт-амперная характеристика образца.

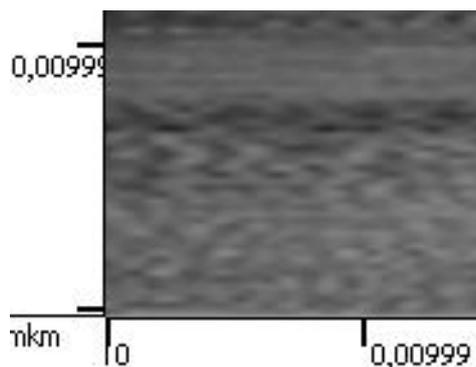


Рис. 8. СТМ- изображение образующих глобулы сферических частиц

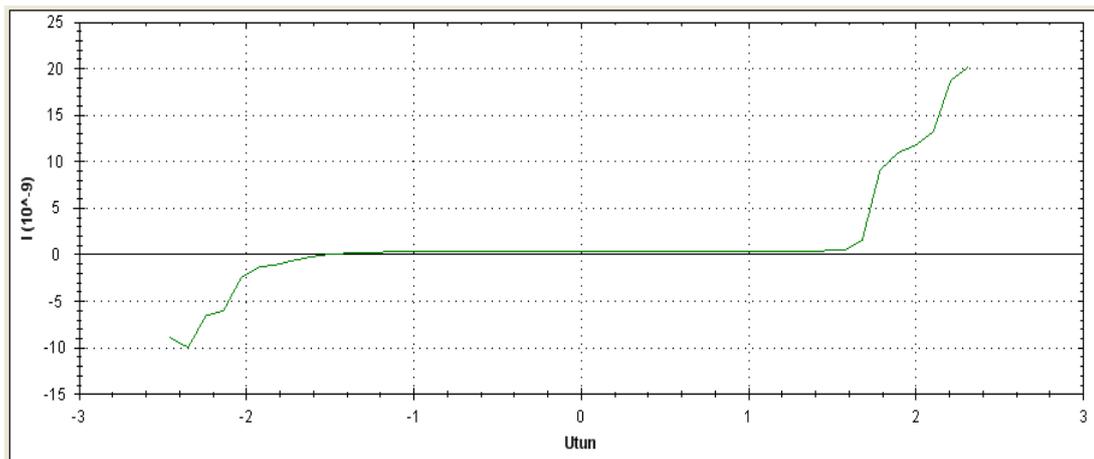
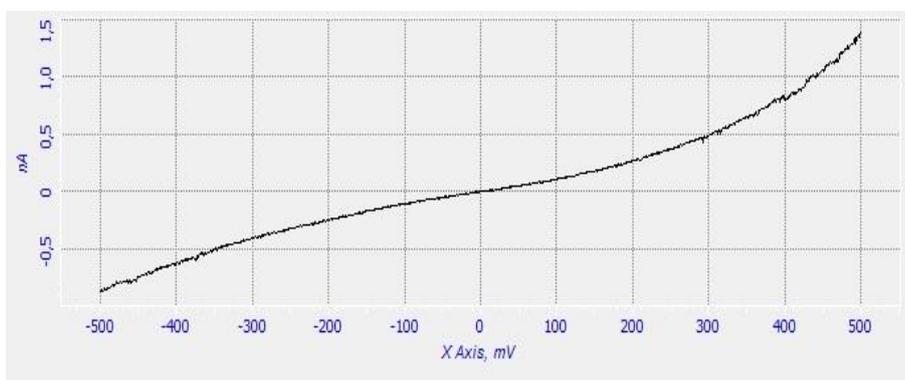


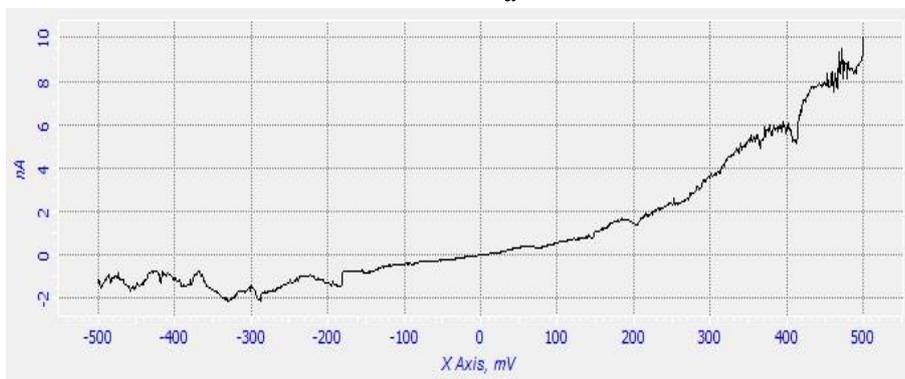
Рис. 9. Полученная с использованием комплекса УМКА вольт-амперная характеристика

Исследование образцов с проводящим слоем Cr

Сканирование образцов, подготовленных по описанной выше технологии без нанесенных пленок золота в режиме СТМ на сканирующем зондовом микроскопе Solver Next так же позволило получить вольт-амперные характеристики исследуемой структуры. На рис. 10 (а, б) представлены ВАХ различных точек исследования.



а



б

Рис. 10. ВАХ для различных точек исследования: а- зависимость, характерная для контакта металл-металл, б- нелинейность ВАХ

Для большинства точек сканирования образца ВАХ имеет в целом нелинейный симметричный вид с близким к линейному участком вблизи области нуля, характерный для контакта металл-металл (рис. 10а). Однако для нескольких точек в близкой к нулевым значениям области была обнаружена сильно выраженная нелинейность (рис. 10б). Указанные различия, по-видимому, можно отнести к неравномерности пленки опала по толщине.

Сравнение вольт- амперных характеристик образцов с проводящим слоем Cu и Cr показывает, что использование в качестве буферного слоя Cr приводит к снижению ВАХ, что является следствием роста удельного слоевого сопротивления.

Заключение

Было выявлено, что исследование рельефа поверхности и электрофизических характеристик тонких опаловых пленок на проводящей поверхности возможно методом сканирующей туннельной микроскопии. Результативное сканирование оказалось возможным при условии небольшой толщины пленки опала, составляющей один – три глобулярных слоя.

На основании проведенных экспериментальных исследований роста тонкой металлической пленки, осажденной на поверхность тонкой плёнки синтетического опала и возможности исследования полученной наноструктуры методами туннельной и атомно-силовой микроскопии было выявлено, что использование в качестве буферного слоя Cr приводит к снижению ВАХ, следовательно, изготовление образцов, в которых адгезия проводящего слоя обеспечивается технологией нанесения без применения буферного слоя более целесообразно.

Очевидно, что в дальнейшем используемое оборудование и методики могут быть использованы для наноразмерного исследования поверхностей и изучения электрофизических характеристик формируемых образцов планарных опаловых структур.

Литература

1. *Беседина К.Н., Вострикова А.В., Двухшерстова О.О., Панфилова Е.В.* Исследование процесса нанесения тонких пленок на наноструктурированную поверхность // Вакуумная наука и техника. Материалы XX международной научно-технической конференции, 2013 – С. 301-303.
2. *Норман Е.Д., Моисеев К.М., Панфилов Ю.В., Булыгина Е.В. и др.* Исследование автоэмиссионных свойств углеродных нанотрубок на опаловых матрицах // Высокие технологии в промышленности России. Материалы XII международной научно-технической конференции. М., 2007 – С. 491-495.
3. *Корнилов В.М., Лачинов А.М.* Исследование полимерных пленок методом сканирующей туннельной микроскопии // Письма в ЖТФ, 2000, Том 26, вып.21. - Стр. 37-43.

УДК 621.793

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПОДЛОЖЕК ИЗ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА FR4 ДЛЯ РЕЛЬЕФНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Василий Денисович Воронов⁽¹⁾, Денис Дмитриевич Васильев⁽²⁾

Студент 5 курса⁽¹⁾, студент 6 курса⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.В. Панфилов

доктор технических наук, заведующий кафедрой "Электронные технологии в машиностроении"

Аннотация

Проведены эксперименты по магнетронному распылению меди на стеклотекстолит FR4 без адгезионного подслоя хрома, с подслоем за два вакуумных цикла и с подслоем в одном

вакуумном цикле. Измерена адгезия покрытия методом скрайбирования. Проведено гальваническое наращивание меди на образцах.

Введение

Из множества возможных материалов для производства печатных плат особое внимание заслуживает фольгированный стеклотекстолит типа FR4. Это диэлектрик на основе нескольких слоев стеклоткани, пропитанных смолой и имеющих нулевую степень горючести. Именно хорошие диэлектрические свойства, стабильность характеристик и размеров, высокая устойчивость к воздействиям неблагоприятных климатических условий и высокие физические и химические характеристики сделали этот материал самым востребованным для производства высококачественных рельефных печатных плат. Стандартный FR4 представляет собой композитный материал на основе стекловолна (стеклотекстолит). Стандартный FR4 толщиной 1,6 мм состоит из восьми слоев ("препрегов") стеклотекстолита. Таким образом, FR4 является наиболее распространённым во всем мире базовым материалом для производства двухсторонних, многослойных и рельефных печатных плат, а так же для производства односторонних печатных плат с повышенными требованиями к механической прочности [1].

Конструкция и технология изготовления рельефных печатных плат (РПП) (рис. 1, б) существенно отличаются от традиционных двухсторонних (ДПП) и многослойных (МПП) плат (рис. 1, а).

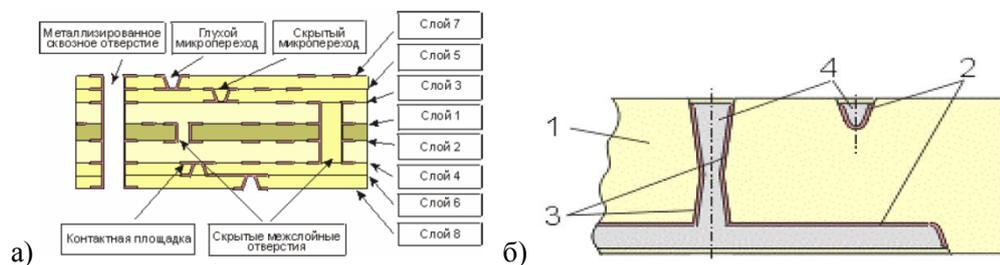


Рис.1. Сечение многослойной (а) и рельефной (б) печатной платы, где 1 – диэлектрическое основание, 2 – медные проводники, 3 – металлизированные отверстия, 4 – рельеф платы, заполненный припоем.

Металлизация (то есть создание на диэлектрическом основании слоя металла, чаще всего меди) в производстве МПП является одним из самых важных технологических этапов, так как во многом определяет электрофизические характеристики и надежность ЭУ, обеспечивает требуемую плотность коммутационных элементов и, тем самым, плотность монтажа ячеек. Самая простая технология металлизации диэлектриков – это фольгирование (например, плакированием слоистых пластиков медной фольгой), поэтому большинство исходных материалов для производства ПП представляют собой фольгированные диэлектрики. Однако, фольгирование не обеспечивает металлизации отверстий (переходных, монтажных) и необходимую плотность коммутации в соответствии с современными требованиями к РПП, что стимулировало появление других технологий металлизации, причем комбинация магнетронного метода нанесения и гальванической технологий осаждения оказалась наиболее пригодной (в смысле технологической совместимости) для изготовления РПП [2].

Цель данной работы - сравнение методов магнетронного осаждения меди на подложки FR-4 для определения более технологичного метода получения покрытия с удовлетворительной адгезией.

Описание экспериментов

Пленки меди и хрома получались методом магнетронного распыления мишени из хрома и меди на установке ВУП при помощи импульсного униполярного источника APEL-M-3PDC в лаборатории кафедры «Электронные технологии в машиностроении».

Каждый из образцов был получен в различном технологическом цикле. Получены три образца – 1) FR-4 с медной пленкой; 2) FR-4 с адгезионным подслоем хрома и медной пленкой

(нанесение хрома и меди производилось за 2 разных цикла на одном магнетроне со сменой мишеней) ;3) FR-4 с адгезионным подслоем хрома и медной пленкой (нанесение хрома и меди производилось за 1 цикл на двух разных магнетронах) (табл. 1).

Таблица 1. Параметры экспериментов

№ п/п	Характеристики	1	2	2	3	3
1	Материал мишени	Cu	Cr	Cu	Cr	Cu
2	Материал подложки	FR-4	FR-4	FR-4	FR-4	FR-4
3	Расстояние, мм	95	95	95	212	95
4	Диаметр мишени, мм	100	100	100	50,8	100
5	Рост, мбар	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
6	P, мбар	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
7	Qар, л/ч	0,63	0,52	0,63	0,63	0,63
8	I, А	0,85	0,64	0,85	0,25	0,4
9	U,В	469	398	469	450	399
10	P, кВт	0,398	0,26	0,398	0,11	0,18
11	F, кГц	20	20	20	20	20
12	T, %	80	80	80	40	80
13	t, мин	13	0,5	13	6	13
14	T выдержки, минут	40	5	40	0	40

Результаты экспериментов

В результате проведенных экспериментов были получены 3 образца (рис. 2).

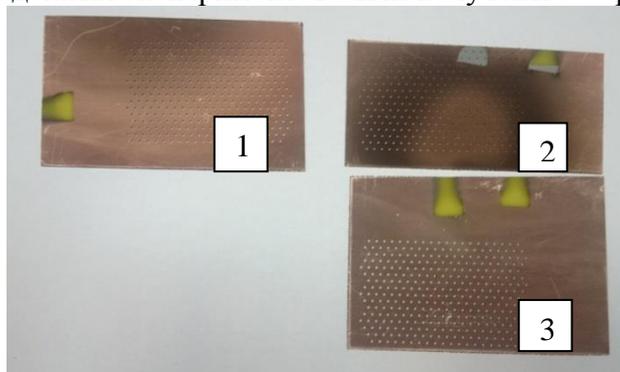


Рис. 2. Полученные образцы с: 1) FR4 (только медное покрытие);
2) FR4 (медное покрытие с адгезионным подслоем хрома за два различных цикла нанесения);
3) FR4 (медное покрытие с адгезионным подслоем хрома в одном цикле нанесения);

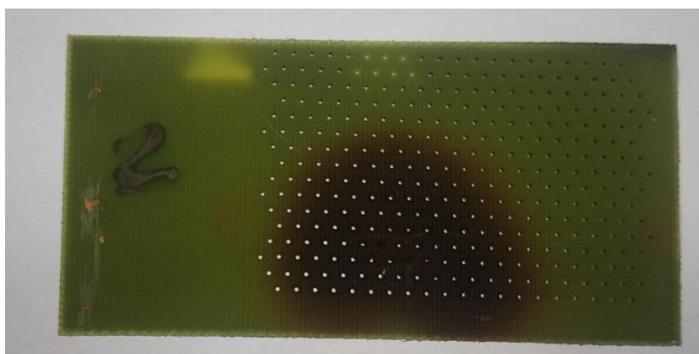


Рис. 3. Прогар подложки из FR-4

Образец №2, наносимый в разных циклах нанесения меди и хрома прогорел, медная пленка вздулась за счет испарения под действием высокой температуры от магнетрона. С

обратной стороны также видны следы прогара подложки, по этой причине на следующий образец медь наносилась при меньшей мощности (рис. 3).

Произведены измерения адгезии подложки (методом скрайбирования) при помощи прибора Elcometr 107 (рис.4). Руководствуясь таблицей эксплуатации, был выбран метод испытания BSEN ISO 2409 : толщина покрытия – 0-60 мкм, тип подложки – твердый, количество режущих зубьев – 6, расстояние между зубьями – 1мм. Производилась наклейка скотча на образцы, а затем плавный отрыв под углом 60 ° (рис. 5).



Рис. 4. Elcometer – 107

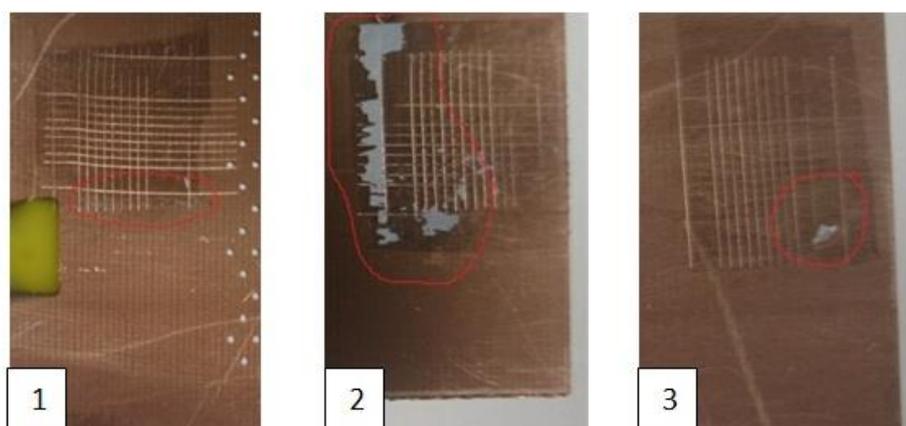


Рис. 5. Результаты скрайбирования 1-го (FR4 с медным покрытием), 2-го (FR4 с медным покрытием и адгезионным подслоем хрома, наносимыми в двух различных циклах) и 3-го (FR4 с медным покрытием и адгезионным подслоем хрома, наносимыми в одном цикле) образцов.

По результатам скрайбирования видно, что адгезия у всех образцов хорошая; оценка адгезии 0 по ISO 2409.

Затем были проведены эксперименты по гальваническому наращиванию меди на каждый образец (табл. 2). Каждый из образцов выдержал процесс (рис. 6).

Таблица 2. Параметры гальванического осаждения меди

№ п/п	Параметр	Значение
1	Плотность тока, А/дм ²	1
2	Напряжение, В	0,3
3	Время осаждения без перемешивания электролита, мин	10
4	Время осаждения с перемешиванием электролита, мин	20

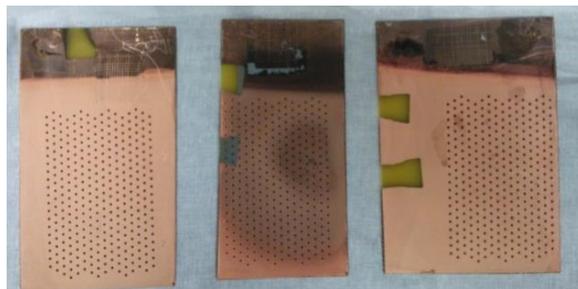


Рис. 6. Образцы после гальванического осаждения меди

Выводы

Результаты нанесения меди с адгезионным подслоем хрома, а также без него в одном и различных технологических циклах показали, что необходимость в нанесении адгезионного подслоя хрома на стеклотекстолит FR4 отсутствует, а также полученное покрытие выдерживает метод гальванического наращивания. FR4 не выдерживает высокие температуры и прогорает, поэтому при металлизации поверхности медью методом магнетронного распыления необходимо избегать высокого температурного воздействия осаждаемого материала на подложку.

Литература

1. <http://www.pcb.spb.ru/fr4.html>
2. <http://www.studfiles.ru/dir/cat34/subj1252/file11411/view123726.html>

УДК 621.793

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Максим Алексеевич Данилов⁽¹⁾, Василий Владимирович Петров⁽²⁾

Студент 4 курса⁽¹⁾, ассистент⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.И. Беликов

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Дальнейшие перспективы развития техники и технологий упрочняющих покрытий связаны с разработкой композитных покрытий, обеспечивающих достижение более высоких эксплуатационных характеристик деталей и узлов, где они применяются. Одним из вариантов композитной структуры является дискретно-планарная реализация, когда в качестве элементов структуры покрытия используются ограниченные фрагменты тонкой пленки с линейными размерами от десятков до сотен микрометров и толщиной порядка микрометров. Такие фрагментарные покрытия получили название «дискретные покрытия» и уже показали свою эффективность для целей повышения износостойкости твердых упрочняющих покрытий, поскольку они менее подвержены адгезионному отслоению, контактному выкрашиванию и растрескиванию. Основными характеристиками дискретного покрытия является размер дискретов (элементов структуры) и коэффициент сплошности. Сплошность – отношение площади поверхности покрытия к общей площади образца, коэффициент сплошности определяется на основании приведенного соотношения (рисунок 1).

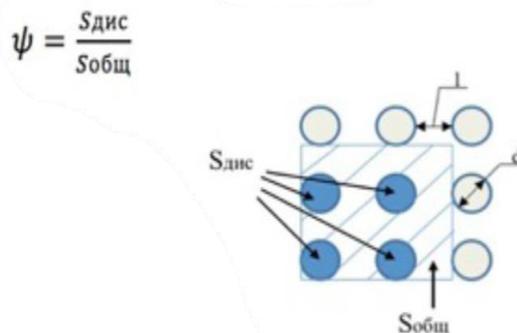
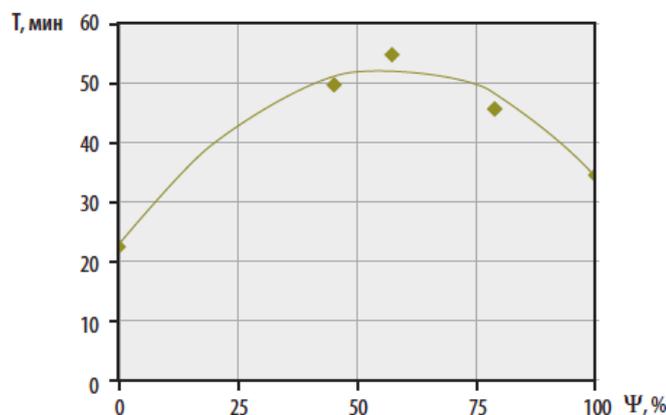


Рис. 1. Схема дискретного покрытия

Авторами работы [1] проводились исследования по изучению влияния сплошности дискретных покрытий на упрочнение инструмента. При этом, дискретное покрытие наносилось на режущий инструмент вакуумным дуговым методом через масочную сетку, а полученное покрытие в натурных испытаниях тестировалось на износостойкость при металлообработке. По результатам исследований было определено, что при сплошности покрытия 58-62% на режущем инструменте можно добиться увеличения времени его стойкости в два раза, в сравнении с инструментом без покрытия, и в полтора раза, в сравнении с инструментом со сплошным покрытием, что отражено на соответствующей зависимости (Рисунок 2).

Рис. 2. Зависимость стойкости (T , мин) инструмента с покрытиями от коэффициента сплошности покрытия ψ [1].

На кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ имени Н.Э.Баумана был предложен новый технологический метод получения дискретных покрытий [2]. Суть метода заключается в удалении лазерным лучом части поверхности покрытия, предварительно нанесенного на поверхность подложки. Однако, этот метод еще не применяется в промышленности и требует изучения и отработки режимов.

Для оценки технологических возможностей предлагаемого метода были проведены следующие исследования. В качестве исследуемых образцов использовались подложки с покрытием AlTiN толщиной от 0,5 до 2 мкм для отработки режимов лазерной обработки и формирования различной дискретной структуры. Обработка проводилась на станке для лазерной гравировки LDesignerFII при мощности излучения $W=2$ Вт, скорости обработки $V=600$ мм/с, обработка проводилась за один проход, в проектную модель обработки закладывались дискреты круглой формы.

В качестве подложек использовались стальные пластины размером 70x70x2 мм, на поверхности которых формировались зоны с разными параметрами дискретной структуры. На

рисунке 3 приведена фотография полученного образца, цифрами обозначены четыре зоны с дискретами разных размеров и одинаковой сплошностью, но разными расстояниями между ними ("1" – 0,2 мм; "2" – 0,4 мм; "3" – 0,8 мм; "4" – 1 мм).

На рисунках 4 и 5 представлены снимки, полученные на сканирующем электронном микроскопе, поверхностей зоны 1 и зоны 3 с дискретами размером 0,2 и 0,8 мм (4,5 а) и укрупненный вид дискретов (4,5 б). На основании анализа полученных изображений можно сделать вывод, что при малом расстоянии между дискретами система модуляции лазерного луча установки лазерной гравировки формирует существенные погрешности обработки, поэтому дискреты зоны 1 имеют наибольшие отклонения от номинальной геометрической формы и имеют рваные края. При этом дискреты зоны 3, расстояние между которыми значительно больше, получились более качественными.

Наличие капельной фазы по краям дискретов (хорошо видно на рисунке 4 б) свидетельствует о том, что в процессе изменения мощности при модуляции лазерного излучения, при определенной мощности покрытие перестает испаряться, а начинает плавиться. При этом, вероятно, может происходить микросварка поверхности покрытия с поверхностью подложки, что также может влиять на характеристики получаемого покрытия.

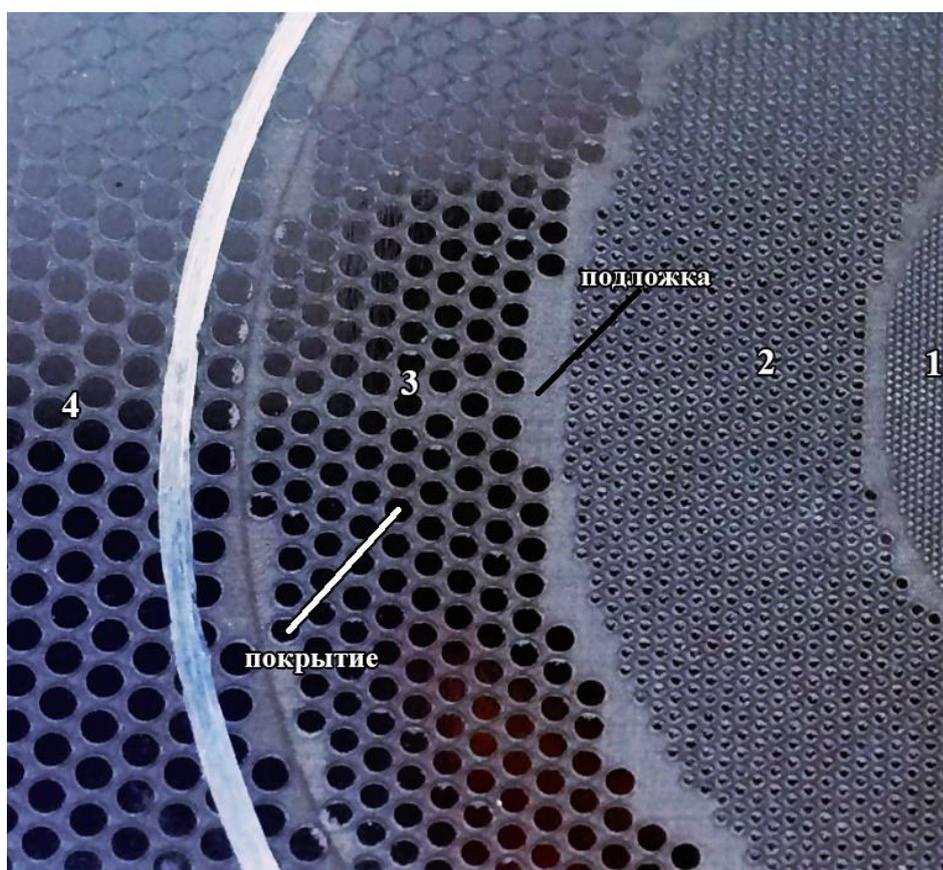


Рис. 3. Внешний вид образца с подготовленными структурами

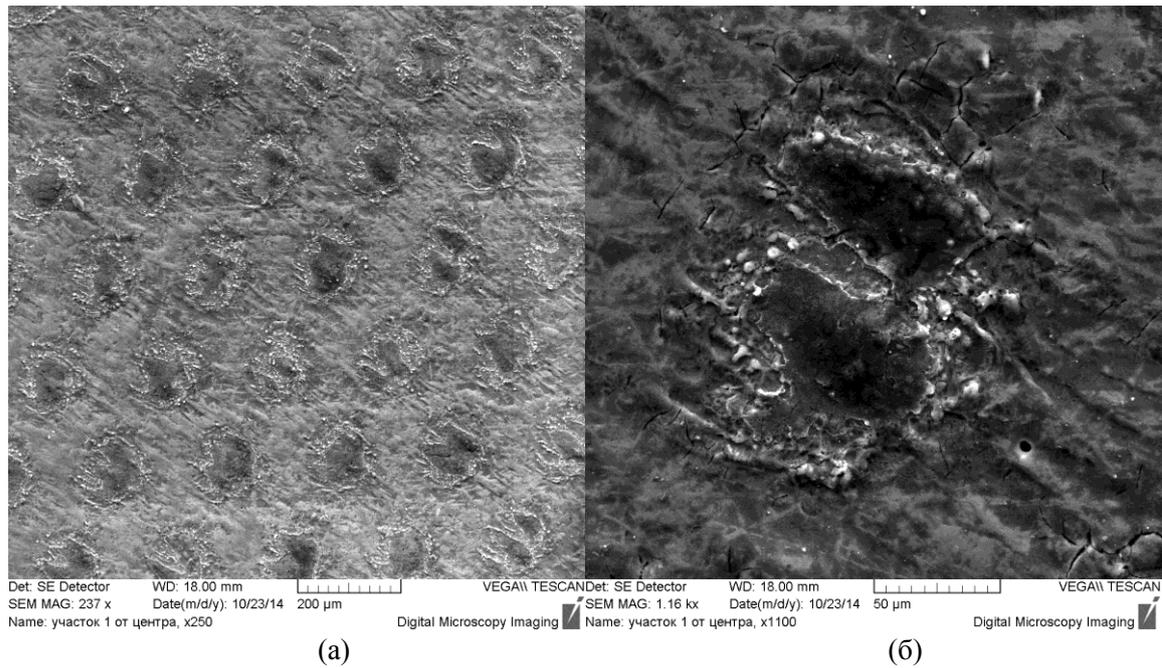


Рис. 4. Внешний вид на дискреты (а) и увеличенный вид дискрета (б), зона 1.

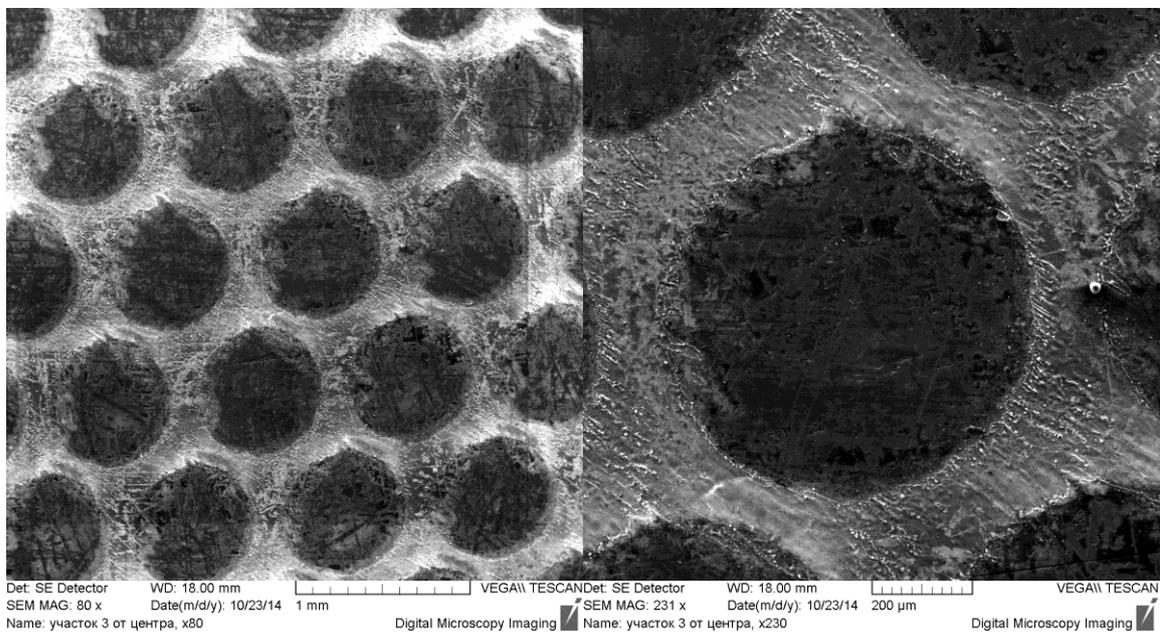


Рис. 5. Вид на зону покрытия (а) и увеличенный вид дискрета (б), зона 3.

На рисунке 6 представлены снимки поверхности образцов дискретных покрытий с разными коэффициентами сплошности (Φ) и разными расстояниями между дискретами (L).

Анализ полученных изображений свидетельствует о том, что с уменьшением расстояния между дискретами увеличивается отклонение от номинального размера дискрета. По всей видимости, это вызвано высокой скоростью перемещения лазерного луча, а также тем, что энергия луча падает постепенно, а не мгновенно. Однако, подобрав соответствующие технологические режимы, возможно, удастся получать дискретные покрытия с элементами малого размера и высокого качества.

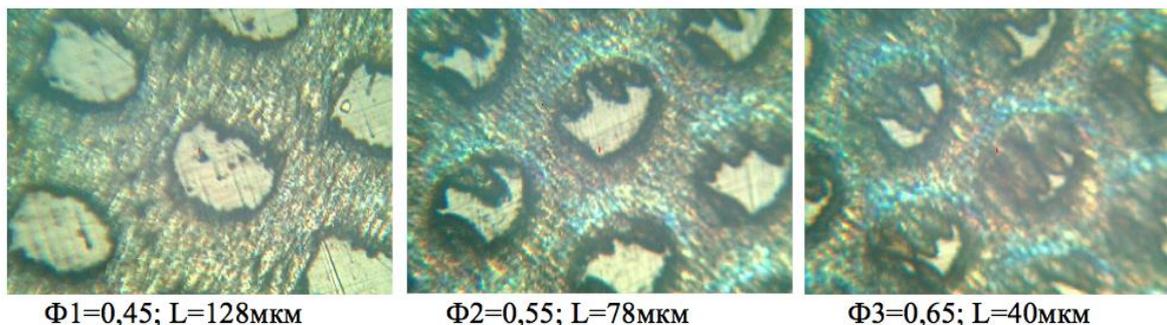


Рис. 6. Дискретные покрытия с разными сплошностями

Выводы

1. Предлагаемая технология лазерной обработки сплошного покрытия обеспечивает формирование дискретного покрытия с элементами размером более 100 мкм.
2. При увеличении расстояния между дискретами, снижаются погрешности формы, дискреты получаются более круглыми, с более ровными краями. Предположительно, отклонение от формы и размеров дискрета происходит за счет погрешностей системы модуляции лазерного луча.
3. Для получения качественной дискретной структуры с размерами элементов менее 200 мкм требуется прецизионное лазерное оборудование и оптимизация режимов.

Литература

1. *Сорока Е.Б.* PVD покрытия на режущем инструменте. – М.: Металлообработка 2/2010.
2. *Беликов А.И., Петров В.В.* Комбинированные композитные покрытия триботехнического назначения, формируемые методами вакуумного осаждения и лазерной обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. - М.: Машиностроение - 2012, №4, с.9-15.

УДК 621.389

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТВЕРСТИЙ В СЛОИСТЫХ ПЛАСТИКАХ НА ПРОЦЕСС ИХ МЕТАЛЛИЗАЦИИ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Алина Александровна Доброносова⁽¹⁾, Бахруллохуджа Баходурович Самадов⁽²⁾

Студент 4 курса⁽¹⁾, студент 4 курса⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.М. Моисеев

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

На сегодняшний день в электронике стала очевидна существенная диспропорция между уровнем интегральных микросхем и технологиями создания конечной продукции. Это обусловлено тем, что международные стандарты ISA и PC/104 предполагают использования многослойных печатных плат в совокупности со штыревыми разъемами. Подобные решения, существующие со времен ламповых схем, уже исчерпали себя. С целью устранения данного несоответствия были разработаны рельефные печатные платы (РПП).

Обычные многослойные платы по сравнению с двусторонними обладают множеством недостатков, среди которых можно назвать низкую надежность, проблемы с монтажом

неоднородных элементов, сложность обеспечения заданных волновых сопротивлений, но плотность монтажа у них гораздо выше.

Были разработаны технологии, которые позволили обычные двусторонние печатные платы дополнить возможностью построения схем любой сложности. Их главная суть заключается в отказе от фольгированных диэлектриков и переход на производство рельефных печатных плат.

Положительные результаты испытаний и практически десятилетняя эксплуатация опытных образцов в тяжелейших условиях убедительно доказывают, что уже сегодня на предлагаемой базе может быть создан совершенно новый класс электронных устройств. По основным характеристикам (надежность, помехозащищенность, простота изменения конфигурации) на сегодняшний день в зарубежном и отечественном приборостроении равных РПП нет.

Принципиально важно, что производить рельефные платы можно на стандартном технологическом оборудовании. Процесс не предполагает использование дорогих компонентов (безусадочной фотопленки, фотостекол, фольгированных диэлектриков и пр.) Себестоимость квадратного дециметра при среднесерийном производстве несколько меньше стоимости многослойной платы аналогичного предназначения. Очень важно, что РПП полностью ремонтпригодны [1].

Одной из наиболее существенных проблем при производстве данных плат является металлизация отверстий. К ним предъявляют повышенные требования относительно толщины и равномерности. Для получения качественной металлизации необходимо подобрать оптимальные методы и режимы.

В данной статье приведены результаты экспериментов по нанесению металлизационного медного покрытия методом магнетронного распыления при варьировании расстояния от образца с отверстиями различных диаметров до магнетрона. И также представлены результаты измерений толщины пленки в лазерном сканирующем микроскопе.

Подготовка образцов

Для проведения экспериментов была разработана тестовая структура из слоистого пластика FR4 толщиной 1,5 мм. Данное расположение отверстий на подложке позволяет оценить их пропыляемость в различных областях образца. Всего на подложке девять участков, каждый из которых содержит ряд отверстий (от 0,3 мм до 0,9 мм), расположенных под различными углами.

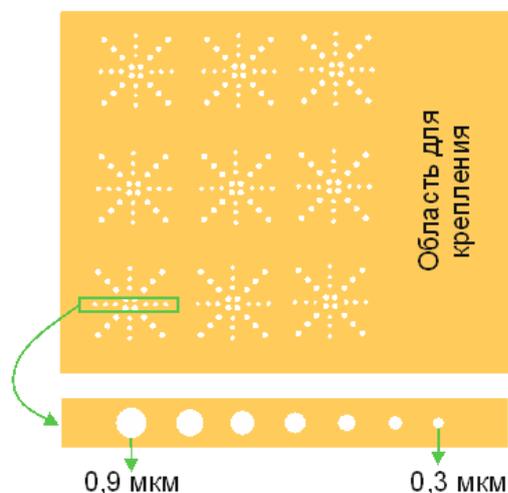


Рис. 1. Подложка с отверстиями

Для проведения механической обработки на ЧПУ необходимо создать координатный файл сверления. Существуют ряд ПО, с помощью которых можно получить эту структуру.

Однако среди всех существующих ПО САМ350 является наиболее простым для выполнения данных задач. В этой среде графические данные легко конвертируются в координатный файл.

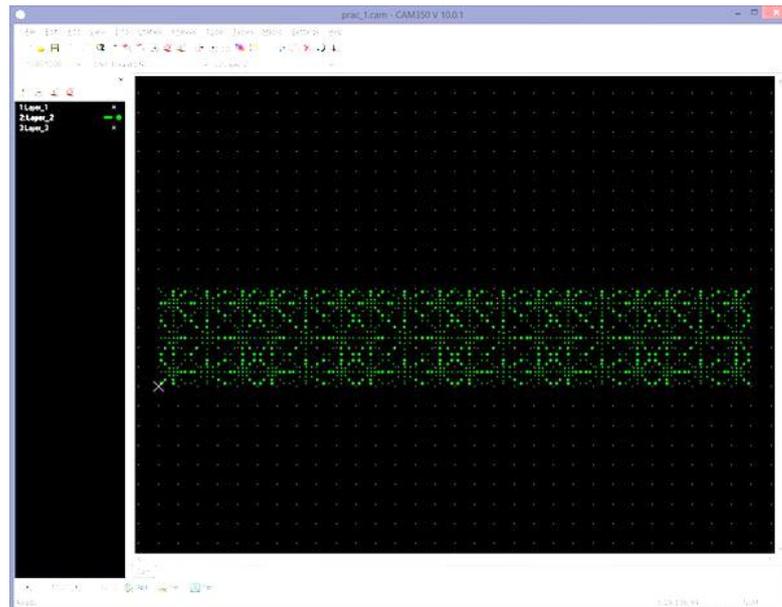


Рис. 2. Тестовая структура в САМ350

Сверление образцов FR4 производилось сверлильно-фрезерным станком Bungard CCD/MTC(Computer Controlled Drilling machine/Manual Tool Change, управляемый компьютером (Computer Controlled Drilling machine) с ручной сменой рабочего инструмента (Manual Tool Change). Bungard CCD/MTC имеет рабочее поле 325x495 мм и предназначен для сверления и фрезерования (изоляция / вырезка по контуру) плат и приборных панелей. Станок имеет прецизионный шпиндель с частотой вращения от 25000 об/мин до 60000 об/мин. Частота вращения регулируется и контролируется программно. Материалы доступные для обработки: FR3, FR4, G10, TeflonTM, DuroidTM, алюминий, латунь, ПВХ, органическое стекло.

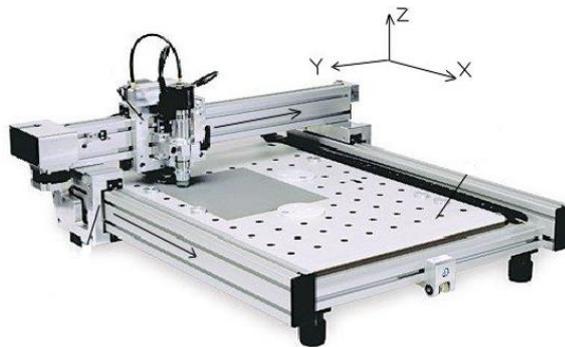


Рис. 3. Станок Bungard

Описание экспериментального стенда

В описываемых экспериментах использовался источник ионов с анодным слоем, установленный на малогабаритной установке МВТУ-11-1, характеристики которого представлены ниже, и магнетрон МАС 2”.

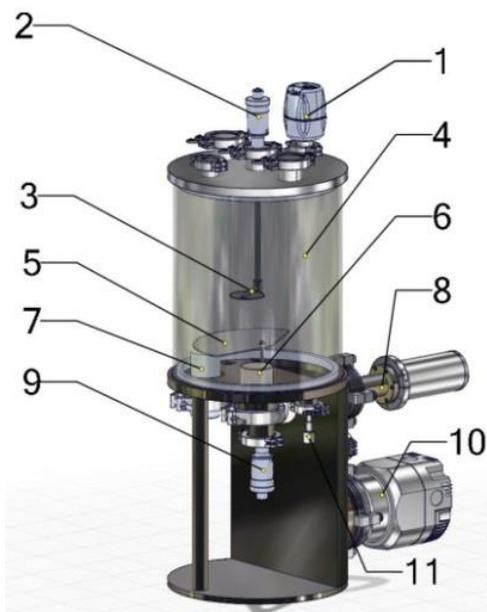
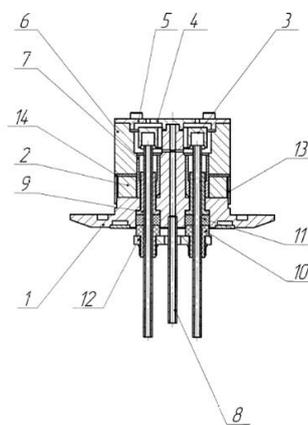


Рис. 4. Вакуумная малогабаритная лабораторная установка: 1 – датчик вакуума широкодиапазонный; 2 – ввод вращения подложкодержателя; 3 – подложкодержатель; 4 – вакуумная камера; 5 – заслонка; 6 – магнетрон; 7 – источник ионов; 8 – электронно-лучевой испаритель; 9 – ввод вращения заслонки; 10 – турбомолекулярный насос; 11 – порт напуска газа

Установка выполнена на базе современных вакуумных и технологических компонентов. Для вакуумной откачки применены спиральный форвакуумный и гибридный турбомолекулярный насосы, обеспечивающие безмасляную технологическую среду. Установлена двухканальная система подачи газа на основе регуляторов расхода газа, которая позволяет подавать смесь из двух газов с заданной стехиометрией в одну из них по выбору, или одновременно регулировать два потока одного газа. Установка имеет в своем составе три технологических источника: магнетрон, источник ионов и электронно-лучевой испаритель. Данные типы источников широко используются в современных технологических процессах, позволяют работать с проводящими и диэлектрическими материалами как в виде материала создаваемого наноструктурированного тонкопленочного покрытия, так и в качестве подложки.



а)



б)

Рис. 5. Изображение (а) и схема (б) источника ионов с холодным катодом с анодным слоем ИК-023: 1 – водоохлаждаемый корпус; 2 – магнитная система; 3 – водоохлаждаемый анод; 4, 5 – катодные пластины; 6 – боковой магнитопровод; 7 – внутренний вкладыш; 8 – штуцер; 9 – внутренний изолятор; 10 – наружный изолятор; 11 – резиновое кольцо; 12 – прижимная планка; 13 – обечайка; 14 – полиамидная прокладка

Таблица 1. Основные технические данные и характеристики источника ионов

Параметр	Значение
Напряжение разряда	0 – 3000 В
Ионный ток	3 – 60 мА
Рабочее давление	$(1,8...2,6) \cdot 10^{-2}$ Па
Энергия ионов	0,5 – 0,8 кэВ
Время непрерывной работы	2 ч
Масса	1,3 кг

Компактный магнетрон МАС 2^м, снабженный высокочастотным источником питания, позволяющий распылять и наносить пленки различных материалов (проводников, полупроводников, диэлектриков)

Таблица 2. Основные технические данные и характеристики магнетрона

Параметр	Значение
Диаметр мишени	50 мм
Максимальная мощность (постоянный ток/ВЧ)	1000/40 0 Вт
Напряжение катода	200 – 1000 В
Максимальный ток	3 А
Частота ВЧ-генератора	13,56 МГц

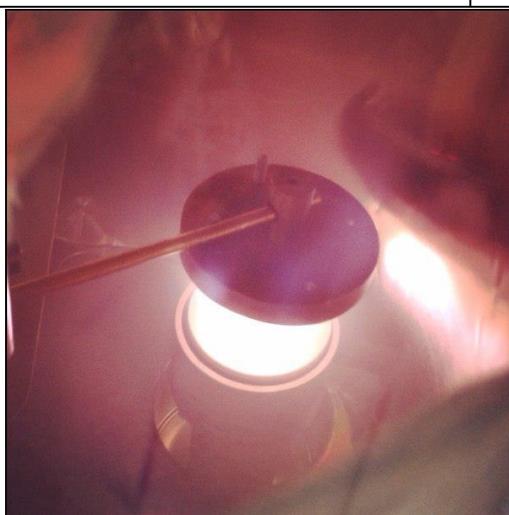


Рис. 6. Фотография магнетрона во время работы

Проведение эксперимента и результаты измерений

В данной статье приводится ряд экспериментов для определения равномерности тонкопленочного покрытия на дне отверстий и скорость осаждения в зависимости от их диаметра и расстояния от образца до магнетрона. Для осуществления контроля выбранных параметров под подложку устанавливался образец без отверстий из того же материала.

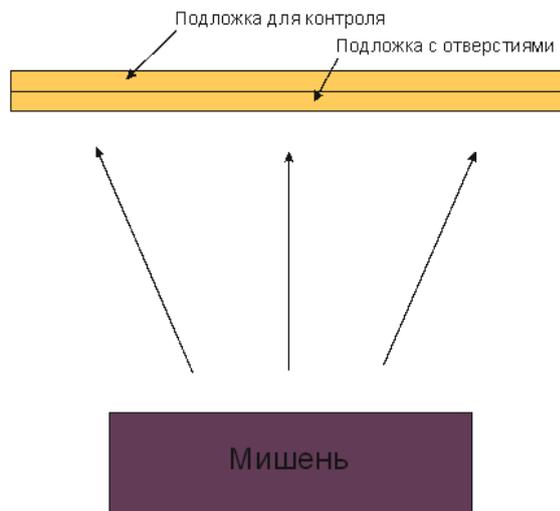


Рис. 7. Схема нанесения тонкопленочного покрытия

Предварительно осуществлялась ионная обработка образцов слоистого пластика для обеспечения наиболее качественного покрытия. Выбранный режим представлен в таблице 3.

Таблица 3. Параметры процесса предварительной ионной обработки подложек

Параметр	Значение
Показание РРГ Ag,	15 куб.см.
Рабочее давление	0,19 Па
Напряжение пучка	0,25 В
Ток пучка	5 мА
Время травления	5 мин

Далее были проведены два эксперимента металлизации образцов при различных расстояниях до мишени. Выбранные режимы представлены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры процесса нанесения пленки Cu

Параметр	№ образца	
Рабочее давление, Па	,27	,25
Показания РРГ, куб.см.	5	5
Мощность магнетрона, Вт	0	0
Время тренировки мишени, мин		
Время нанесения, мин	0	0
Расстояние от образца до магнетрона, мм	0	20

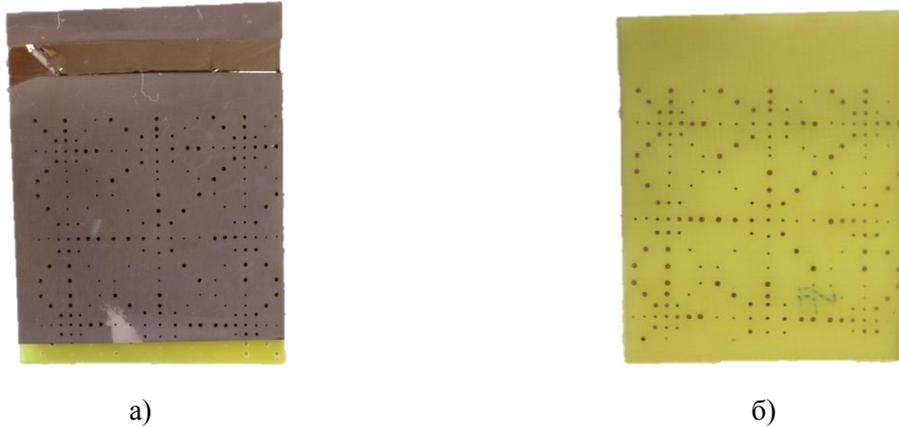


Рис. 8. Образцы после металлизации (а) вид на подложку с отверстиями и (б) вид на образец, который находился под подложкой с отверстиями

Исследование образцов производилось на лазерном сканирующем 3D микроскопе Keyence VK-X100/X200 с разрешением 1 нм, совмещающий в себе оптический микроскоп с функцией анализа данных растрового электронного микроскопа и точность профилометра.

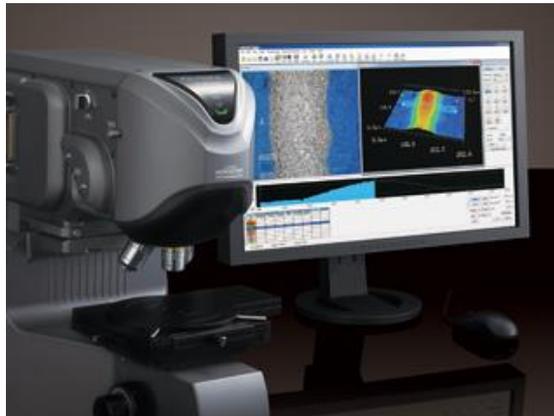


Рис. 9. Сканирующий лазерный микроскоп Keyence

Для контроля пропыляемости и равномерности исследуем поверхность образца, который находился под подложкой с отверстиями, то есть получившееся дно отверстий.

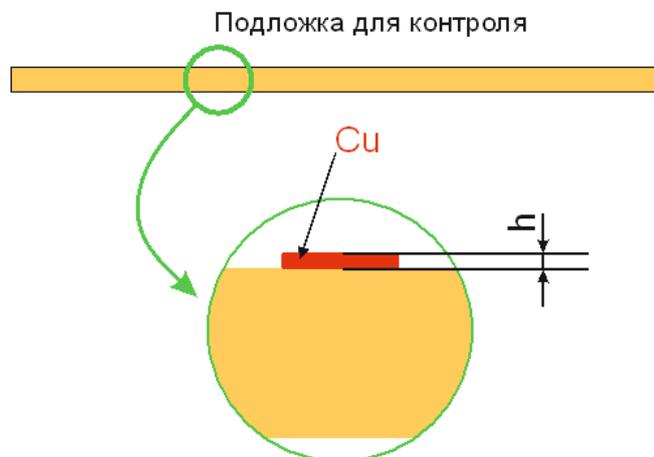


Рис. 10. Схема контроля подложек

В результате исследований получились следующие скорости осаждения меди для различных диаметров в центре подложки, представленные в таблице 5.

Таблица 5. Скорости осаждения Cu

Параметр	Диаметр отверстий						
	0,9 мкм	0,8 мкм	0,7 мкм	0,6 мкм	0,5 мкм	0,4 мкм	0,3 мкм
Скорость осаждения образца №1, нм/мин	63	60	50	43	26	20	6
Скорость осаждения образца №2, нм/мин	15	17	16	16	3	2	0

После измерения толщин дна отверстий в центре и на периферии подложки определяем равномерность.

Таблица 6. Равномерность покрытия

Параметр	№ образца	
	1	2
Равномерность, %	30	10

Выводы и заключение

В результате проведенных экспериментов удалось определить равномерность покрытия и пропыляемость отверстий при варьировании расстояния до мишени магнетрона. Наилучшая равномерность получилась при расстоянии 30 мм. Определена скорость осаждения для различных диаметров. При диаметре отверстий 0,9-0,6 пропыляемость лучше на 50-80%. Для улучшения равномерности и пропыляемости необходимо осуществить сканирование образца над магнетроном.

Литература

1. Богданов А., Богданов Ю. Двусторонние рельефные печатные платы /А. Богданов, Ю. Богданов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2002. - № 2. – С. 36-37.

УДК 62-97/-98

АНАЛИЗ СИСТЕМ БАЗИРОВАНИЯ И СОВМЕЩЕНИЯ СЛОЕВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Максим Александрович Золотарев

Студент 6 курса

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.Б. Цветков

доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Все более жесткие требования к печатным платам, предъявляемые изготовителями электроники, вынуждают производителей печатных плат постоянно совершенствовать технологию изготовления и обновлять технологическое оборудование. Этот процесс неизбежен и требует высококвалифицированной работы технологов по разработке техпроцесса и выбору технологического оборудования, позволяющего изготовить печатную плату по выбранной технологии с заданной точностью. Задача технолога усложняется, если речь идет не об обычных двухсторонних или односторонних, а многослойных платах (МПП). В данном случае,

помимо прочего, очень важную роль в качестве выпускаемой продукции играет совмещение и прессование слоев МПП.

Структура многослойной печатной платы предусматривает сборку в единый пакет ее отдельных слоев с точным координатным сопряжением функциональных элементов, например, сквозных отверстий и микропереходов с контактными площадками и внутренними слоями, паяльной маски с контактными площадками внешних слоев (рис. 1).

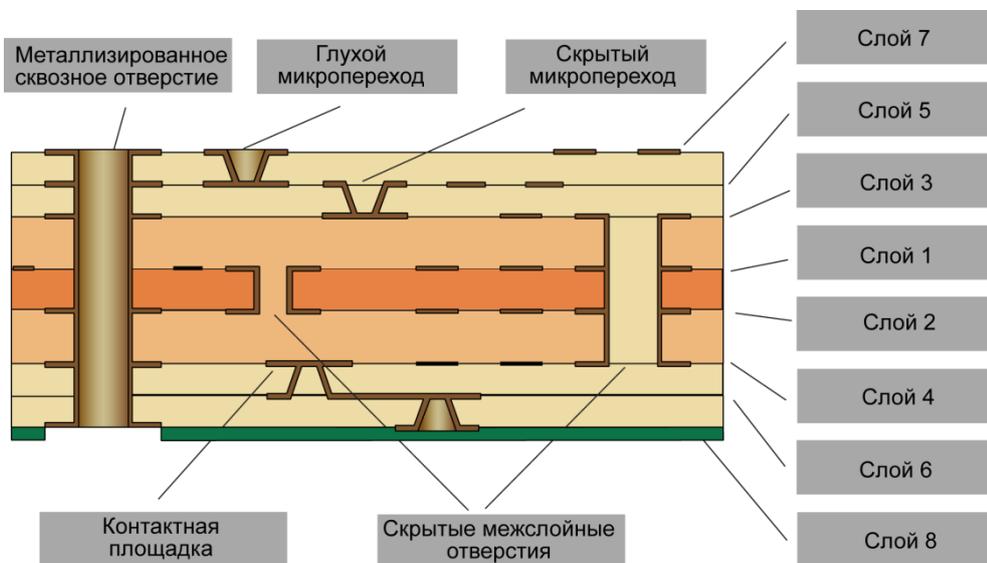


Рис. 1. Структура многослойной печатной платы

Поэтому в процессе изготовления МПП многократно проводятся операции совмещения: фотошаблонов с внутренними и внешними слоями при формировании топологий, слоев с системами механического и лазерного сверления, а также слоев между собой при прессовании.

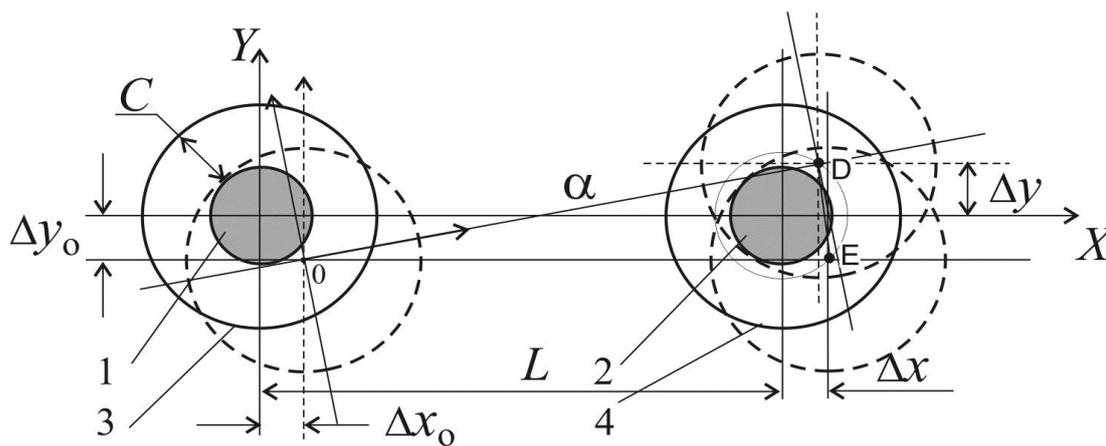


Рис. 2. Базирование объекта на штифтах

1,2 – штифты, 3,4 – отверстия

Наибольшее распространение в промышленном производстве МПП получили системы механического совмещения при совместном базировании совмещаемых объектов по штифтам и базовым отверстиям. Однако данная технология не всегда отвечает требованиям точности современных печатных плат. Следующим шагом стало автоматическое оптическое совмещение с использованием вакуумного захвата совмещаемых элементов. Однако даже

усовершенствованная технология имеет свои недостатки и в некоторых аспектах уступает классическому штифтовому совмещению.

Цель данной статьи - анализ факторов, определяющих точность совмещения слоев МПП при базировании на штифтах и оптическом совмещении, классификация схем базирования и совмещения, позволяющая обоснованно оценивать область применения различных вариантов схем, их возможности и ограничения.

Совмещение по штифтам

Остановимся подробнее на совмещении по штифтам. Ограничение перемещений объекта по двум координатам и его вращения в общем случае может быть обеспечено двумя штифтами. Ось X проходит через центры штифтов и является базовой линией, ось Y перпендикулярна ей, начало координат ($X = Y = 0$) – в центре левого штифта. Точки на базируемом объекте имеют текущие координаты. Для обеспечения посадки отверстий на штифты между ними предусматривают гарантированный зазор C , который является причиной неопределенности положения совмещаемых объектов (на рис. 2 зазор показан утрированно большим для ясности построений).

Уменьшение зазора C и увеличение межцентрового расстояния L , очевидно, приводят к уменьшению возможных координатных сдвигов и углового разворота. При этом уменьшение C сопряжено с капиталоемким повышением точности всего процесса обработки изделий и собственно системы базирования, а увеличение L – предельно экономичный и эффективный способ уменьшения угловых погрешностей, весьма существенных на периферии объекта. К сожалению, это решение, очевидное с точки зрения инженерной интуиции, не всегда применяется в полной мере.

Компенсация возможных масштабных погрешностей за счет увеличения зазора C возможна при дополнительном обеспечении базирования по перпендикулярной координате или при особом расположении и форме базовых отверстий. При этом необходима конструктивная модификация системы базирования. Уменьшение влияния случайных погрешностей, неустраняемых в процессе изготовления объектов, так же возможно лишь при изменении системы базирования.

В зависимости от последующей технологической операции к совмещению объектов предъявляются различные требования. Например, если деформации платы заранее измерены, для проведения координатного сверления достаточно точно совместить ее базовую точку с центром координатной системы и выбрать угловой разворот. Масштабные искажения платы корректируются системой управления сверлильного станка. Однако в большинстве случаев при совмещении требуется не только точно совместить базовые точки и координатные оси объектов, но и уменьшить влияние масштабных искажений.

Проведем классификацию систем базирования объектов на штифтах по их основным конструктивным особенностям – виду замыкания контактирующих элементов и способу центрирования объектов. Первая особенность определяет степень устранения неопределенности положения объектов из-за гарантированного зазора между штифтами и отверстиями. Вторая – возможность уменьшения влияния масштабных погрешностей как вдоль одной из осей, так и для координатной системы объекта в целом. Известные технические решения, в той или иной степени реализующие эти особенности, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Классификация базирующих систем

ЗАМЫКАНИЕ ЦЕНТРИ- РОВАНИЕ	НЕТ	ШТИФТ ПО ОТВЕРСТИЮ	ОБЪЕКТ ПО БАЗОВОЙ ЛИНИИ	ОБЪЕКТ ПО ЦЕНТРИРУЮЩИМ ШТИФТАМ
ПО ОДНОМУ ШТИФТУ				
ПО ОДНОЙ ОСИ				
КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМЫ				

Рассмотрим представленные в классификации схемы базирования, обозначая их номерами I,J, где I - номер строки, J - номер столбца.

Схема 1.1: ось первого штифта определяет базовую точку системы базирования, а сам он предотвращает смещения объекта по координатным осям. Второй ромбический штифт ограничивает лишь угловой разворот объекта и за счет срезанных участков компенсирует размерные и координатные погрешности штифтов и отверстий, обеспечивая их соединение. Данной схеме базирования присущи все погрешности, представленные на рис. 2 – координатные сдвиги и угловой разворот, определяемые величиной зазора С и межосевым расстоянием L. Такая схема используется при установке заготовки печатной платы на сверлильные и фрезерные станки для последующей механической обработки.

Схема 1.2 позволяет устранить влияние зазора за счет замыкания и самоцентрирования штифта по отверстию. Для этого могут применяться разжимные штифты, которые в исходном состоянии имеют меньший, чем у отверстия диаметр, а при разжиге - самоцентрируются по нему.

В современной модификации этой схемы замыкание отверстия и штифта выполняется за счет изменения его формы (рис. 3, а). Каждый штифт 1 выполнен в виде четырехгранной пирамиды с квадратным основанием 2 со скругленными углами, грани которой срезаны по конической образующей 3. На вершине пирамиды - заходная часть 4 со скругленной вершиной.

Квадратное основание штифта базирует объекты с прямоугольными отверстиями 5, а коническая часть – с круглыми 6. Штифты подпружинены снизу, при этом коническая часть штифта контактирует с отверстием независимо от погрешностей его размеров (рис. 3, б), обеспечивая его самоустановку. Один из штифтов расположен в углу рабочего поля в вершине прямого угла, образованного дополнительными штифтами по сторонам базирующей системы.

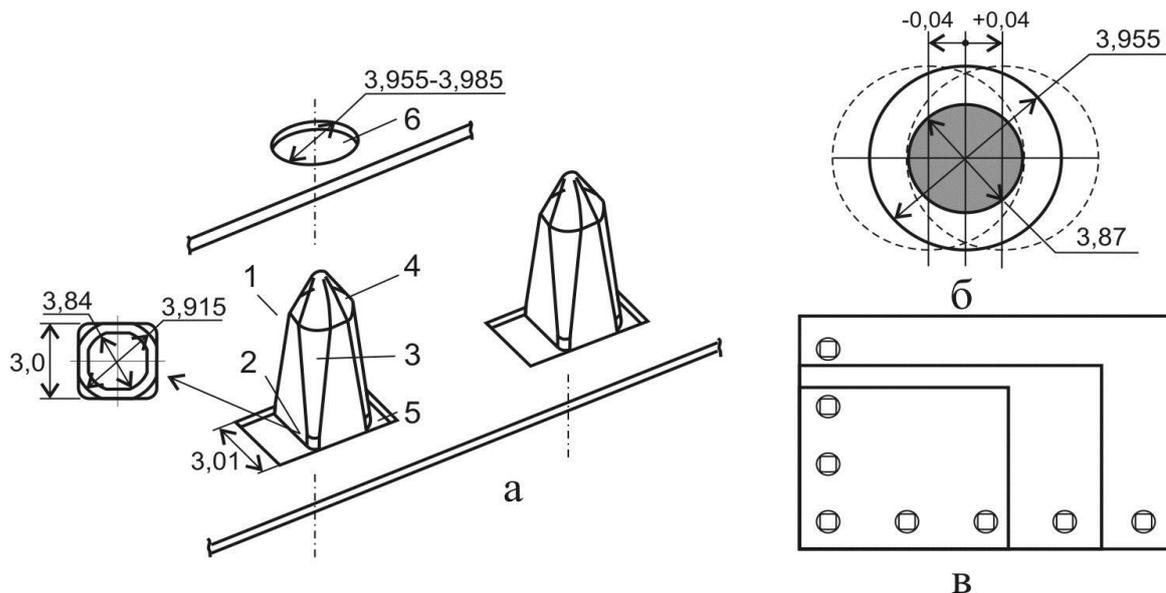


Рис. 3. Замыкание по конической поверхности
а – базирование объектов с прямоугольными и круглыми отверстиями, б – расчетная схема, в - расположение штифтов в базирующей системе

Это позволяет использовать одну и ту же конфигурацию штифтов для базирования плат разного размера (рис. 3, в).

Схема 1.3 обеспечивает самоустановку отверстия по центрирующему штифту за счет выбора формы базирующих отверстий. Одно из них – квадратной формы, развернутое на угол 45 град., центрируется по штифту при контакте по образующим. Второе - продолговатое отверстие - расположено параллельно одной из осей объекта и позволяет сопряженному с ним штифту самоустановиться при базировании. Прижим отверстий объекта к штифтам происходит с помощью разжимного штифта на противоположной стороне рабочего поля.

Заметим, что рассмотренные варианты обеспечивают центрирование объекта относительно одного из штифтов. Масштабные погрешности при этом не устраняются, они нарастают пропорционально координате X.

Центрирование по одной из осей объекта обеспечивается размещением базирующего отверстия на одной из осей и частичной или полной заменой круглых базирующих отверстий пазами (слотами).

Схема 2.1: при использовании круглого отверстия оно размещается на центральной оси заготовки, а слоты – слева и справа от нее. При наличии масштабных погрешностей штифты самоустанавливаются в слотах вдоль соответствующей координаты. Центрирующий слот может быть дополнительно размещен на противоположной стороне рабочего поля для увеличения межцентровых расстояний.

Схема 2.2 повышает точность базирования за счет замыкания центрального отверстия с разжимным штифтом.

Схема 2.3, в которой часть слотов размещена под углом к центральным осям, позволяет базировать слои с взаимными масштабными искажениями по 2 осям. Как и в схеме 1.3, в данном случае предусмотрено кинематическое замыкание слотов и штифтов под действием силы тяжести при наклоне базовой плоскости или с помощью разжимного штифта.

В результате применения схем 2.1 – 2.3 одна из осей заготовки совмещается с соответствующей осью системы базирования, при этом абсолютные значения масштабных погрешностей вдоль этой оси уменьшаются вдвое.

Центрирование координатной системы объекта должно обеспечить совмещение его центра и координатных осей с центром и координатными осями системы базирования. Результатом является уменьшение вдвое абсолютных значений масштабных погрешностей по обеим осям.

Схема 3.1 позволяет центрировать координатную систему при наличии существенных масштабных погрешностей благодаря использованию слотов, разнесенных по перпендикулярным осям. Недостатком является то, что между штифтами и отверстиями предусматривается гарантированный зазор, являющийся причиной неопределенности положения объектов.

Схема 3.2 предназначена для замыкания штифтов и отверстий при центрировании объекта. Все штифты выполнены в виде продолговатых поворотных кулачков, способных после установки объекта выбрать зазоры в слотах и центрировать объект.

Схема 3.3 имеет целью замыкание осей объекта и базирующей системы при центрировании его координатной системы. Для этого одна из сторон каждого клиновидного штифта размещена на центральной оси базирующего устройства. Геометрически соответствующие стороны штифтов и отверстий составляют единые прямые линии, сопрягающие между собой координатные системы объекта и базирующего устройства. Данная схема не получила практического применения, так как очень чувствительна к неортогональности осей и случайным погрешностям.

Схема 3.4 осуществляет выборку зазора при центрировании объекта с кинематическим замыканием штифтов и отверстий, что устраняет неопределенность положения объекта. При перемещении штифтов под углом к центральным осям происходит их кинематическое замыкание с отверстиями, формируется система равновесных сил и за счет этого осуществляется разворот и центрирование объекта[1].

Несмотря на все многообразие технических приемов уменьшения погрешности, штифтовая технология совмещения не может обеспечить точность, необходимую для производства современных плат 5 класса точности и выше. Также использование штифтов уменьшает ресурс фотошаблонов и повышает риск их механического повреждения. Следующим шагом в технологии совмещения явилось оптическое совмещение, но не «на глаз», как это было на заре технологии печатных плат, а с использованием высокоточной системы машинного зрения.

Автоматическое оптическое совмещение

Новый тип совмещения открывает новые возможности для проектирования установок экспонирования и сборки пакетов МПП. Суть заключается в отказе от скрепления совмещаемых объектов друг с другом посредством штифтов и применении системы реперных знаков и машинного зрения для взаимного позиционирования. Закрепление при этом, как правило, производится вакуумным захватом, что позволяет продлить срок службы фотошаблонов в случае с фотолитографией. Помимо этого, с помощью оптического совмещения становится возможной технология прямого экспонирования, при которой засветка фоторезиста производится без фотошаблонов, напрямую. Итак, рассмотрим подходы, применяемые в установках автоматического оптического совмещения для фотолитографии.

Совмещение с помощью подвижной рамы – самое распространенное решение, применяемое в высокоточных установках для экспонирования через фотошаблоны. В данном случае закрепление фотошаблонов может производиться с двух сторон заготовки посредством вакуумного захвата к верхней и нижней створке рамы. Разрежение подается через желоба, выполненные на плоскости стекла и задающие требования к размеру фотошаблонов. Рассмотрим типовую раму совмещения, применяемую в промышленных установках (Рис.4).

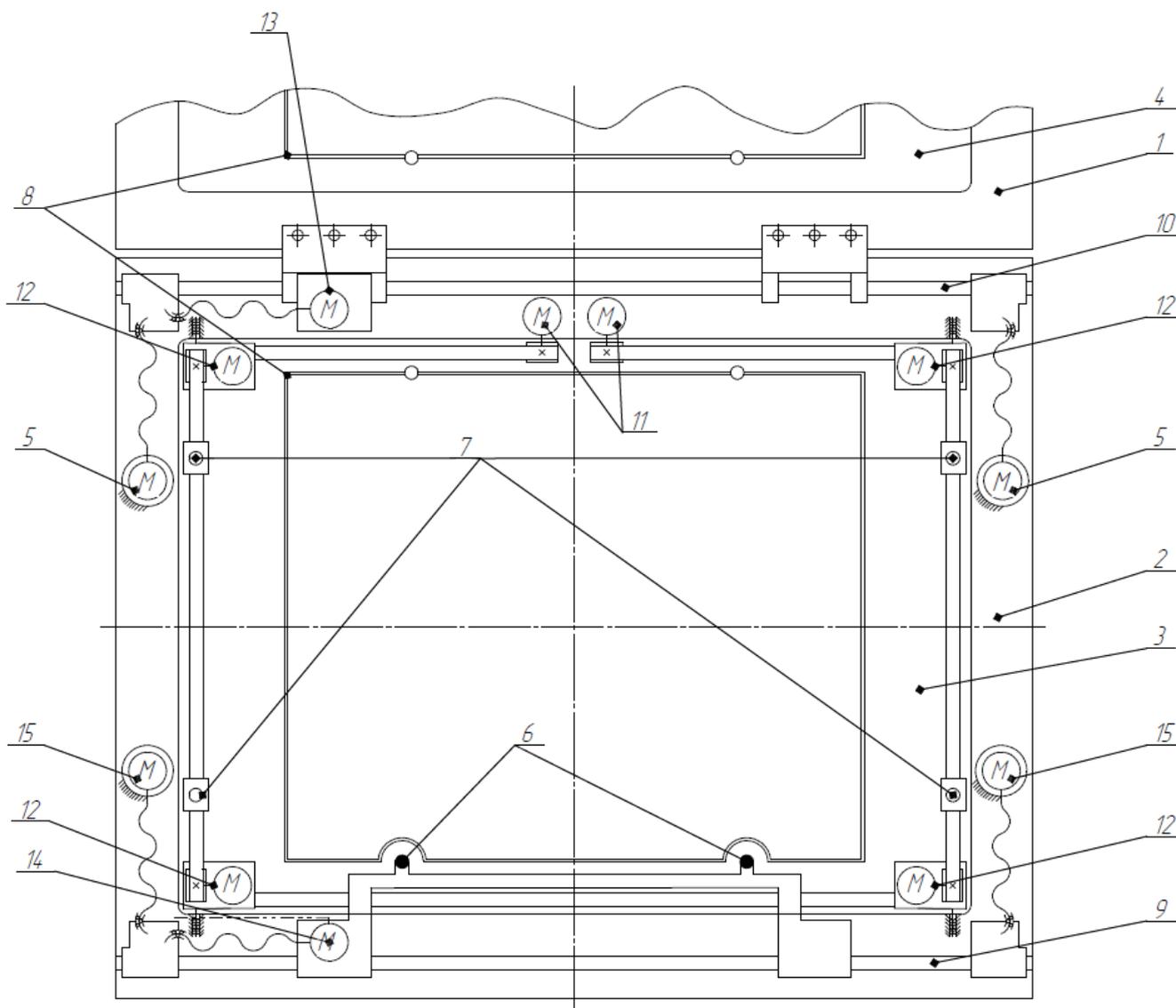


Рис. 4. Схема типовой рамки автоматического оптического совмещения

1 – верхняя створка; 2 – нижняя створка; 3 – стекло нижней створки; 4 – стекло верхней створки;
5 – двигатель верхней створки ось Y; 6 – пара штифтов на подвижной каретке; 7 – камера машинного зрения; 8 – желоб вакуумного захвата; 9 – направляющая штифтов; 10 – направляющая верхней створки;
11 – двигатель камер ось X; 12 – двигатель камер ось Y; 13 – двигатель верхней рамки ось X;
14 – двигатель штифтов ось X;

Пара фотошаблонов кладется на нижнюю створку 2 на базирующие штифты 6 для первичной ориентации. Отверстия для этих штифтов выполняют большим диаметром, исключая возможные деформации. Затем верхняя створка 1 закрывается и включается откачка. Разрежение подается через штуцеры в вакуумные желоба 8, выполненные в стеклах створок 3 и 4. Таким образом, выполнен захват фотошаблонов. Далее заготовка печатной платы кладется на штифты по предварительно просверленным базовым отверстиям, если на ней был уже сформирован рисунок отверстий. Если экспонированию подлежит слой, который еще не был просверлен, то он располагается вручную с упором нижней стороной в штифты, так как не к чему осуществлять привязку топологии на фотошаблонах. Стоит отметить, что штифты в первом случае играют роль манипулятора заготовки, они не связаны с фотошаблонами, так как в них отверстия для первичной ориентации заведомо больше.

Теперь можно закрывать верхнюю створку для автоматического совмещения. Камеры машинного зрения 7 захватывают специальные метки, расположенные на каждом элементе

совмещения. Для фотошаблонов это обычно специальный рисунок, который разнесен на 2 шаблона и должен воссоединиться на просвет при верном совмещении. Для платы – базовое отверстие, выполненное при сверлении. Что касается слоев, то совмещение в этом случае ведется только для фотошаблонов, так как слой представляет собой чистый лист, привязываться не к чему. Камеры обычно выставляются с помощью двигателей 11 и 12 по заранее выставленным координатам реперных знаков. Захватив метки, система обрабатывает изображение и выдает необходимые команды на соответствующие двигатели для позиционирования.

Фотошаблоны совмещаются посредством перемещения верхней створки, подвижно закрепленной на оси 10. Для перемещения по оси Y оба двигателя 5 вращаются синхронно и перемещают посредством передачи винт-гайка ось верхней створки. Движение по оси X осуществляется двигателем 13 через передачу винт-гайка. Двигатель или гайка может быть связана с петлями верхней створки. При вращении он отталкивается от закрепленной на валу бобышки и перемещает створку вдоль её оси. Угловой разворот осуществляется движением одного из двигателей 5. При этом, для предотвращения заклинивания, двигатели располагаются на поворотных опорах при жестком закреплении к оси створки. Также возможна реализация посредством гибкой части на винте, например передача вращения через трос или карданную передачу.

Совмещение с платой происходит через штифты 6, позволяющие перемещать заготовку. Штифты закреплены на подвижной каретке, которая также имеет свою ось 9 и может скользить вдоль неё. Перемещения платы происходит аналогично перемещению верхней створки, через двигатели 15 по оси Y и на заданный угол и через двигатель 14 вдоль оси X.



Рис. 5. Установка совмещения и экспонирования Oles AT30

После того, как элементы будут совмещены с заданной точностью, включается откачка пространства между двумя створками для плотного прилегания шаблонов к заготовке. При этом, если совмещение меток оказалось сбито, вакуум сбрасывается, и происходит корректировка положения элементов, после чего снова происходит откачка. В итоге, когда картина совмещения находится в допуске в состоянии прижима, рамка уезжает в камеру засветки, где производится экспонирование.

В качестве примера рассмотрим установку совмещения и экспонирования Oles AT30, показанную на рис.5.

Установка оборудована 4-х камерной автоматической системой совмещения для каждой из двух независимых рамок экспонирования (всего в установке 8CCD-камер). Эта установка

экспонирования позволяет добиться точности совмещения до 10 мкм. Она подходит для производства плат 5 класса точности и ниже[2].

Рассмотрим на её примере систему реперных знаков, применяемых для совмещения (Рис.6). Нижняя пленка имеет метку в виде прямого креста. Верхняя пленка имеет метку в виде диагонального креста, а диаметр контрольного отверстия обеспечивает позиционную информацию для платы. При экспонировании внутренних слоев контрольное отверстие отсутствует, так как еще не сформирован массив отверстий. Совмещение производится по 2 меткам-крестам.



Рис. 6. Плата, нижняя пленка, верхняя пленка, совмещение

Такие установки обычно используют крупные производства, так как цена относительно велика. Зато экспонирование и совмещение производится на одной установке, экономится и время и место. Существует упрощенный вариант, если уже имеется установка экспонирования, и бюджет ограничен.

Одностороннее совмещение вакуумным захватом представляет собой установку оптического совмещения без возможности экспонирования. Совмещение в таких установках производится по предварительно сформированным отверстиям в заготовках и меткам на фотошаблонах. При этом возможно совмещение только одного шаблона с платой за одну установку. При этом для экспонирования внутренних слоев без сформированных отверстий можно совместить шаблон с шаблоном, скрепить их и использовать как пакет для многократного экспонирования. Такой подход обеспечит ускорение процесса, однако можно потерять в точности. Совмещение на отдельной машине дает возможность использовать имеющиеся установки экспонирования при переходе на повышенные точности совмещения. Рассмотрим схему типовой установки на рис.7.

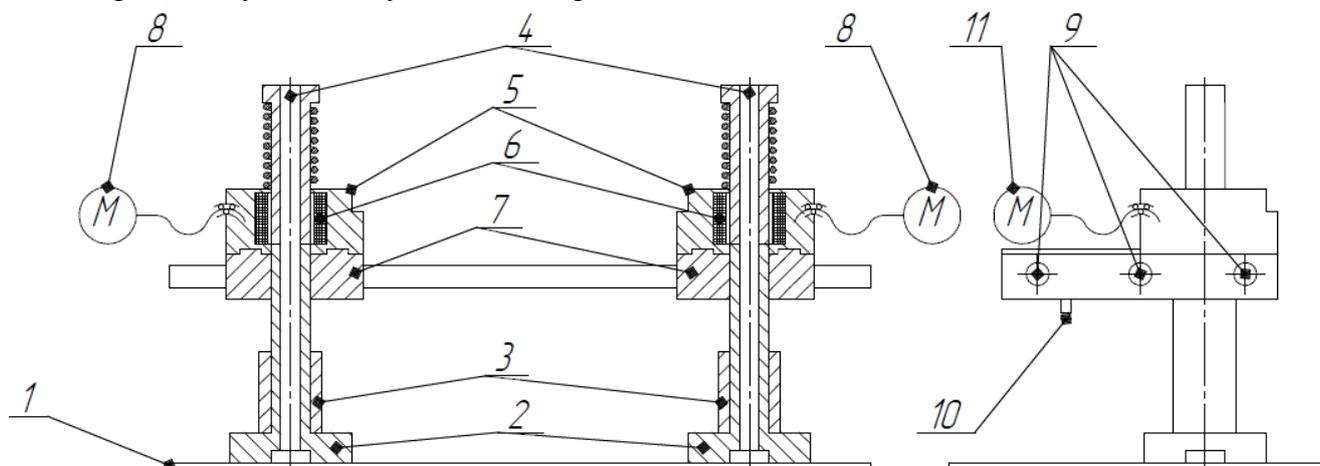


Рис. 7. Схема одностороннего совмещения вакуумным захватом

1 – заготовка; 2 – прижимная ножка; 3 – упор ножки; 4 – канал подвода вакуума; 5 – держатель ножки; 6 – катушка; 7 – подвижные каретки с рельсами; 8 – двигатели осей X; 9 – направляющие кареток; 10 – камера машинного зрения; 11 – двигатели оси Y

Реализация намного проще, чем в предыдущем варианте. Заготовка 1 располагается на плоскости на центрирующих штифтах или с упором нижней части в штифты. Сверху кладется

фотошаблон, при этом предварительное ориентирование производится либо по штифтам, либо наведением реперных меток на лазерный указатель. Метками являются отверстия для заготовки и окружности для фотошаблонов. После предварительного позиционирования подается ток на катушку 6 и ножка опускается на плату, так как её верхняя часть является сердечником и втягивается внутрь катушки. Реализация прижима ножки может быть различной, например, с помощью двигателя или под собственным весом. После этого подается разрезание в канал 4, и фотошаблон прихватывается к пяте прижимной ножки.

Далее с помощью камер 10 производится захват реперных знаков и обработка изображения. Исходя из полученной картины, машина выдает команды на соответствующие двигатели для перемещения шаблона. По оси X позиционирование происходит посредством двигателей 8 и передачи винт-гайка. По оси Y – посредством двигателей 11 и передачи винт-гайка. Угловой разворот осуществляется скоординированным движением двигателей по X и Y.

После удачного совмещения, шаблон необходимо скрепить с печатной платой. Обычно для этого используется скотч. В случае с платой, приходится проводить совмещение с 2 сторон, тогда как при изготовлении внутренних слоев, в качестве заготовки можно использовать нижний шаблон. Таким образом, после совмещения и закрепления получится пакет из фотошаблонов, между которыми можно будет помещать внутренние слои несколько раз. Однако следует быть осторожным, это может уменьшить точность. Когда комплект закреплен, остается только перенести его на классическую установку экспонирования для засветки.

Примером такого технического решения является установка автоматического совмещения **Printprocess ExpoAligner** (Рис.8.).



Рис. 8. Установка автоматического совмещения ExpoAligner

Представленная установка использует для совмещения 2 камеры и, соответственно, 2 реперных знака. Заявленная точность совмещения $\pm 7,5$ мкм [3]. Заготовка предварительно базируется с помощью штифтов или лазерного указателя-точки. Оператор кладет заготовку и фотошаблон на специальные штифты, либо на рабочее поле так, чтобы метки примерно совпали с лазерной точкой. Далее спускаются 2 направляющие головки с вакуумным прижимом, и производится окончательное совмещение меток. После совмещения закрепление следует выполнять вручную с помощью скотча. Меткой на заготовке является отверстие, а на шаблоне – окружность меньшего диаметра. Совмещение меток показано на рис. 9.



Рис. 9. Совмещение меток на установке ExproAligner

По такой схеме, помимо экспонирования, может происходить и совмещение при сборке МПП из внутренних слоев перед прессованием. Для многослойных плат повышенной точности недостаточно просто спозиционировать верхний рисунок относительно нижнего на каждом из слоев, также очень важно точно совместить слои друг с другом. После совмещения 2 слоев, они скрепляются друг с другом, как правило, за счет спекания друг с другом, поэтому этот процесс называют бондированием (от английского bonding). Рассмотрим полуавтоматическую установку бондирования **DIS PRS 77** (Рис.10).



Рис. 10. Установка оптического совмещения и бондирования

Совмещение в этой установке происходит аналогично установке, рассмотренной ранее. Особенность заключается в том, что меткой является вытравленное отверстие с медной точкой в центре, то есть метка непрозрачная (Рис.11).

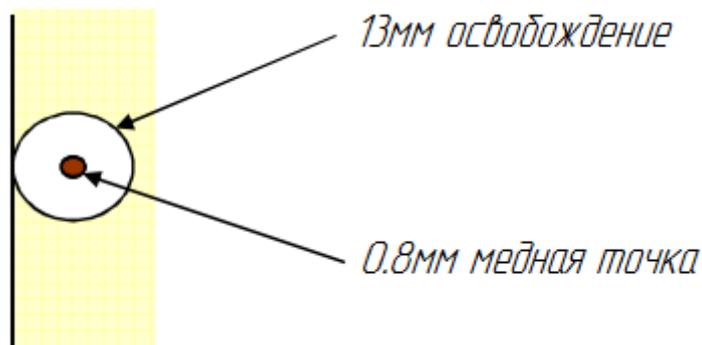


Рис.11. Метки для установки бондрования DIS PRS77

Поэтому машина привязывает все слои к координатам первого слоя, которые считываются в начале работы с новой сборкой. В итоге не получается суммирования погрешности от слоя к слою, что было бы неизбежно при совмещении каждого нового слоя с предыдущим. Помимо этого, установка делит погрешность пополам, симметрично относительно центра платы. Она оборудована 2 камерами машинного зрения и требует 2 метки на слоях. Манипулирование слоем происходит 2 захватами – спереди и сзади.

Принцип совмещения аналогичен представленной на рис.7 схеме. Заявленная точность позиционирования ± 17 мкм, весьма неплохо[4].

После совмещения каждого слоя машина сваривает его с предыдущими слоями в 4 точках, образуя надежно закрепленный пакет. Эта особенность и скрывает основной недостаток таких установок. При последующем прессовании слои претерпевают серьезные масштабные искажения под влиянием температуры. Так как все слои разные, то и ведут они себя по-разному, какие-то сильнее расширяются, какие-то слабее. Но все они собраны в пакет с сварены друг с другом, поэтому при повышении температуры некоторые слои пытаются растянуть, а другие, наоборот, сдавить своих соседей. Такая картина довольно непредсказуема и несет в себе много случайных погрешностей. Для предотвращения этого используют штифтовую сборку на слотах по схеме 3.1 в таблице 1. При этом слои лишены сдвига и углового разворота, но могут независимо друг от друга растягиваться и усаживаться. Точность совмещения, конечно, будет меньше, но зато получаем предсказуемую картину после прессования. Так, измерив на наладочной заготовке масштабные изменения слоев после пресса, можно достаточно точно выбрать погрешности масштабными коэффициентами на этапе подготовки к производству.

В качестве завершения, следует отметить технологию прямого экспонирования, активно набирающую популярность в наше время. Она также стала возможной благодаря точной системе автоматического совмещения с помощью машинного зрения. Однако в этой технологии нет необходимости совмещать фотошаблоны с заготовкой с помощью хитрых механизмов, так как фотошаблонов в этой технологии нет.

Прямое экспонирование – засвечивание фоточувствительного материала и формирование топологического рисунка напрямую, без использования шаблонов. Этот процесс обеспечивается непосредственным облучением резистивного материала в местах, которые необходимо защитить от травления. Не будем останавливаться на плюсах этой технологии, так как существует довольно много описательных статей, в которых подробно раскрыты все преимущества и недостатки. Остановимся на системе совмещения. В этой технологии все совмещение заключается в привязке системы координат машины к реперным знакам на заготовках. Как обычно, на просверленных платах метками являются отверстия. Внутренние слои также поступают в установку без меток. Однако тут есть одно отличие. Экспонирование может производиться только с одной стороны, поэтому после засветки заготовку необходимо перевернуть и экспонировать обратную сторону. Тут то и вновь возникает необходимость

совмещения слоев друг с другом. С платами дело обстоит легче, базовые отверстия читаемы с 2 сторон, система вновь находит метки и снова привязывается к ним. А вот на слоях метки отсутствуют, а совмещать стороны друг с другом также необходимо. Поэтому установка должна сама поставить необходимые реперные знаки. Когда слой поступает в машину, она засвечивает на фоторезисте метки, с привязкой к которым рисует изображение. После переворота, система ищет засвеченные метки на оборотной стороне и экспонирует новую сторону относительно оборотной. В итоге получаем засвеченную с двух сторон заготовку, готовую к химическим операциям.

Рассмотрим установку прямого экспонирования PrintProcess Apollon-DI-A11 (Рис. 12).



Рис. 12. Установка прямого экспонирования Apollon-DI-A11

Установка дает возможность выбора местоположения реперных знаков на заготовках. Для достижения лучшего результата точности, необходимо расположить метки на большом расстоянии друг от друга. Местоположение меток должно быть определено на 2 сторонах специальными апертурами программы SAM350 и специальным кодом (D-Code), которые нужно отметить в программе установки. Для внутренних слоев используются метки в программе экспонирования, а для внешних – в программе сверления. Для внешнего слоя даже предусмотрена система защиты от неверной ориентации сторон заготовки. В программе сверления предусматриваются 4 больших отверстия диаметром 3-4 мм и 3 маленьких отверстия диаметром $0,8 \pm 0,1$ мм. Как и в случае с внутренними слоями, отверстия должны быть выполнены специальной апертурой с уникальным кодом (D-Code). Большие отверстия служат для привязки топологии, а маленькие – для определения стороны заготовки. Расположение меток на внутреннем и внешнем слое показано на рис.13.

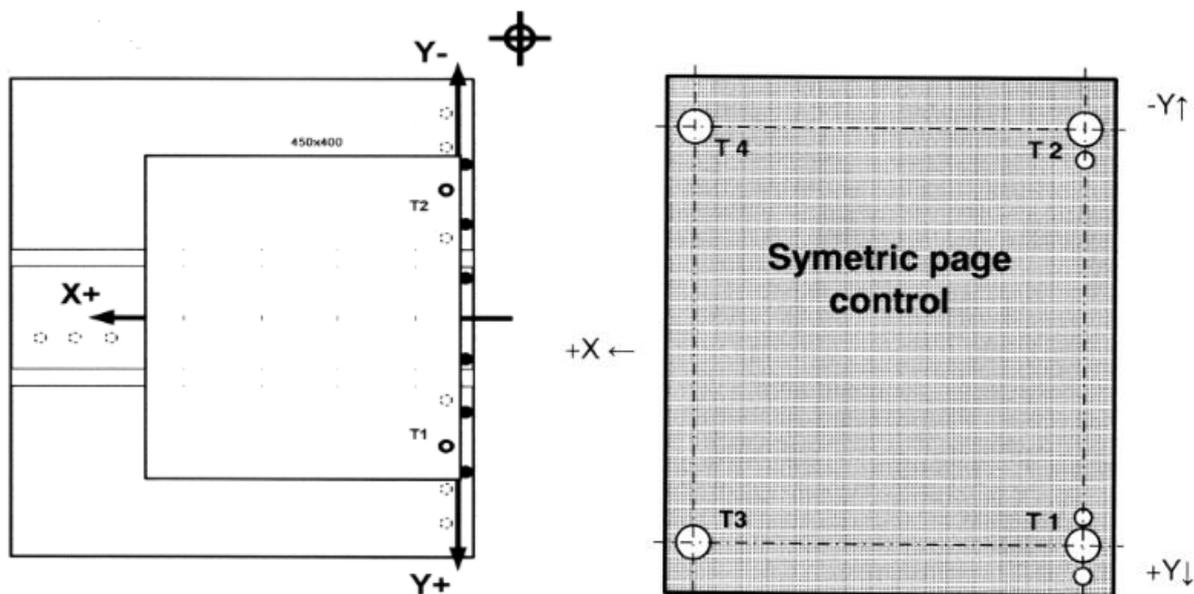


Рис.13. Метки для внутреннего слоя слева, метки внешнего слоя справа

Плата всегда центрируется по оси Y в начало координат машины. По оси X заготовка выравнивается по стопорным штифтам.

Заявленная точность совмещения ± 5 мкм [5]. Это с учетом того, что отсутствуют погрешности фотошаблонов, которые вносят ощутимый вклад в погрешность классической технологии с фотошаблонами. Заявленная минимальная ширина проводника/зазора 25/25 мкм. Это открывает путь в 7 класс точности печатных плат и даже выше.

В заключение стоит отметить тенденцию к упрощению и автоматизации процессов совмещения. При штифтовой технологии сильно влияют человеческий фактор и случайные погрешности. Процесс многокомпонентный, и общая погрешность складывается из суммы всех операций и элементов. При переходе на автоматическое совмещение фотошаблонов суммарное отклонение расположения будет складываться из погрешности оптической системы и погрешности топологии фотошаблонов. Помимо этого, из процесса исключен человеческий фактор в случае автоматического совмещения и экспонирования, что выдвигает этот процесс вперед. Однако и это еще не предел. Следующий шаг исключает еще и погрешность фотошаблонов, а точнее сказать, вообще исключает фотошаблоны. Человеческий фактор отсутствует, нет изменяющихся со временем в размерах фотошаблонов, остается только оптическая система и высокоточные приводы. Однако в полученной последовательности технологий возрастает не только точность позиционирования, но и стоимость оборудования. Выбор остается за конкретным производителем и его требованиями.

Литература

1. Семенов П.В., Цветков Ю.Б. Анализ точности базирования при совмещении слоев многослойных печатных плат // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 11. С. 32–40
2. Установка экспонирования AT30 CL. Инструкция по эксплуатации и обслуживанию. 2008г.
3. http://www.ostec-st.ru/pcb/catalogue/34/view_item/227
4. <http://petrocom.ru/katalog/oborudovanie/sovmeshhenie-i-sborka-paketa-mpp/ustanovka-besshtiftovogo-opticheskogo-sovmeshheniya,-sborki-i-bondirovaniya-paketa-mpp.html>
5. PrintProcess Apollon-DI-A11. Service manual. 2014г.

УДК 30.19.27, 47.13.31

**ПЛАТФОРМА ДЛЯ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ ПРЕЦИЗИОННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**Алексей Андреевич Копылов⁽¹⁾, Дмитрий Константинович Товмаченко⁽²⁾, Тун Лин Аунг⁽³⁾*Магистрант 5 курса⁽¹⁾, студент 4 курса⁽²⁾, магистрант 5 курса⁽³⁾
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»**Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана**Научный руководитель: В.П. Михайлов**доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

Применение устройств точного позиционирования и систем активной виброизоляции чрезвычайно важно при работе с прецизионным оборудованием, в том числе и вакуумным, от которого требуется работа в микрометровом и нанометровом диапазонах. Как пример можно привести использование таких систем в производстве интегральных схем на этапе совмещения и экспонирования в процессе микро- и нанолитографии. В литографии чаще всего в настоящее время применяется экспонирование лучами EUV (Extreme Ultra Violet), однако, наиболее перспективным инструментом экспонирования являются рентгеновские лучи ($\lambda=1$ нм), электронные ($\lambda=4 \times 10^{-3}$ нм) и ионные пучки ($\lambda=5 \times 10^{-5}$ нм), что связано с малой длиной волны излучения, следовательно, потенциально большей разрешающей способностью. Применение пучков заряженных частиц требует создания вакуумной технологической среды. Таким образом, устройство позиционирования, осуществляющее совмещение подложки с шаблоном должно работать в условиях вакуума, не ухудшая его. Кроме того, такие системы можно применить в оборудовании адаптивной оптики, где необходимо перемещать инерционные объекты (зеркала) с точностью до 50 нм. В современных сканирующих зондовых микроскопах (СЗМ) требуется перемещать небольшие объекты с беспрецедентной точностью (до 0,1 нм), однако сама камера СЗМ должна быть защищена от вибраций на частотах 2-200 Гц. В большинстве указанных установок перемещения должны осуществляться по двум и более координатам. Например, для сверхбольшого астрономического телескопа АСТ – 25 с составным главным зеркалом, состоящим из 612 элементарных зеркал шестигранной формы, каждое элементарное зеркало необходимо перемещать по одной линейной и двум угловым координатам. Точность линейного совмещения зеркал должна составлять 50 нм. Постоянная времени системы совмещения должна составлять не более 200 нм. Для обеспечения заданной точности помимо выбора типа привода необходимо обеспечить выбор типа защиты объекта от вибрации фундамента. Как показали ранее проведенные эксперименты, для большинства промышленных зданий амплитуда колебаний строительных конструкции составляет 2 – 4,7 мкм при частоте 2 – 30 Гц, поэтому необходимо обеспечить коэффициент демпфирования (отношение амплитуд выходных и входных колебаний) в диапазоне 0,1 – 0,05. Для обеспечения защиты от вибраций и для точного позиционирования существует ряд устройств, основанных на различных физических принципах. Данная статья посвящена исследованию платформы активной виброизоляции, в которой для защиты от вибраций и для точного позиционирования используются активные демпферы на основе магнитоэологических (МР) материалов.

МР материалы – это так называемые «умные» материалы, способные быстро и обратимо изменять свои физические свойства под действием внешнего магнитного поля. Наиболее широкое распространение получили МР жидкости и МР эластомеры. [1]. Такие среды и материалы получают путем добавления в них частиц железа или кобальта микронных размеров (2-3 мкм). С ростом напряженности магнитного поля вязкость МР жидкостей резко

возрастает вплоть до бесконечности (они практически затвердевают), а жесткость МР эластомеров увеличивается на 40%. [2]

В качестве вязкоупругих сред в МР приводе используются высокомолекулярные вещества (эластомеры, полимеры, композиты и др.). МР эластомер является твердотельным аналогом МР жидкости и получен диспергированием магнитного порошка в жидком силиконовом каучуке с последующей полимеризацией композиции в форме. В качестве магнитных наполнителей используются порошки магнетита с размером от 0,2 до 0,3 мкм и железа от 1 до 10 мкм. По совокупности свойств и в зависимости от того, какое свойство изучается, композит называют по-разному – магнитоэластичный композит или магнитоэластик, магнитореологический эластомер, магнитный гель, эластомер-ферромагнитный композит, эластичный магнит, ферроэласт, магнитострикционный гель. Поскольку композит является новым материалом, то нет еще устоявшейся терминологии. Магнитоэластичный композит, по своим свойствам, является промежуточным материалом между текучими магнитными жидкостями и жесткими магнитоэластами.

МР эластомер представляет собой резиноподобный материал, представляющий собой полимерную матрицу, внутри которой находится взвесь магнитных частиц. Для производства эластомеров используется ряд полимеров: натуральный каучук, акрилатный каучук и др. В качестве магнитных частиц чаще всего используют Fe, FeNi, Co, Ni, FeNdB, SmCo, Alnico и т.п. В предлагаемой платформе в МР эластомерах в качестве матрицы используется силиконовый каучук, а в качестве наполнителя - магнитные частицы карбонильного железа размером 1-10 мкм (Рис. 1). Нас интересуют такие характеристики МР эластомеров как жёсткость, ток трогания, объёмный коэффициент, относительная деформация и магнитный гистерезис. При помощи магнитного поля можно управлять деформацией образцов из МР эластомера и использовать этот эффект для создания прецизионных механизмов перемещения и активных демпферов. Одним из таких механизмов является разработанная на кафедре МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» платформа для активной виброизоляции.

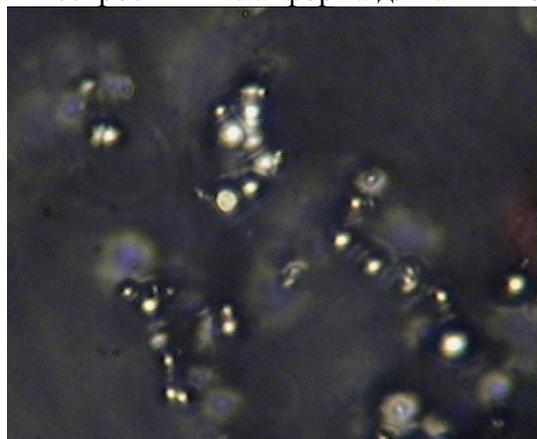


Рис. 1. МР эластомер на основе карбонильного железа

Платформа для активной виброизоляции на основе МР демпферов может быть использована также как привод точного позиционирования. В основе конструкции платформы – четыре демпфера на основе МР эластомеров. Диапазон перемещения платформы составляет 1 мм, точность позиционирования – 0,1 мкм. Нагрузочная способность – 100 Н. Одной из особенностей платформы является то, что она работает в частотном диапазоне 2-200 Гц. В конструкции присутствуют четыре системы квазиулевого жёсткости на основе масс-корректоров, которые увеличивают нагрузочную способность платформы и улучшают её демпфирующие свойства. Платформа может применяться в точных микроскопах, прецизионных станках для механообработки (сверлильных, гравировальных, фрезерных), в

установках для микро- и нанолитографии (фотолитографии, электронной литографии, рентгеновской литографии, ионная литографии), в лазерной технике и т.д.

Активным элементом платформы активной виброизоляции является демпфер. Демпфер содержит электромагнитную катушку с магнитопроводом, над которой закреплён эластомер, закрытый металлическим кожухом. (Рис. 2, 3).

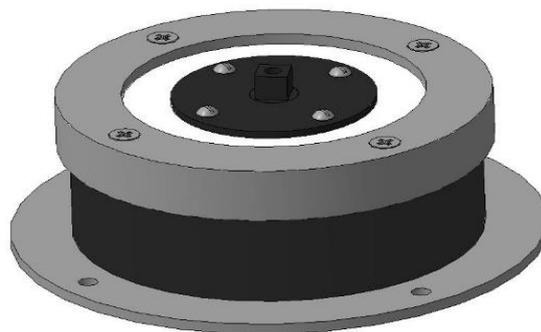


Рис. 2. Активный демпфер на основе МР эластомера

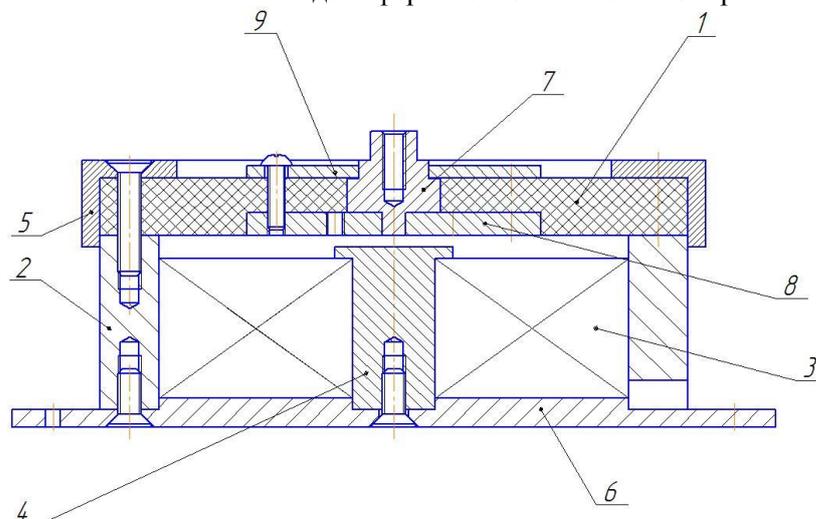


Рис. 3. Разрез активного демпфера на основе МР эластомера:

1 – МР-эластомер; 2 – корпус; 3 – катушка; 4 – сердечник; 5 – стакан; 6 – фланец; 7 – сердечник малый; 8 – фланец нижний; 9 – фланец верхний

Предварительно был проведён статистический анализ эластомера в среде SolidWorks. Для этого была построена 3-D модель основной части демпфера, соответствующая ранее изготовленным чертежам. На модели было указано необходимое закрепление и приложена сила к вершине малого сердечника, равная 50 Н, что соответствует ожидаемой нагрузке на эластомер. (Рис. 4)

В результате статического анализа была получена модель линейного перемещения демпфирующего элемента (Рис. 5), и выявлено максимальное перемещение фланца, закреплённого на эластомере, составляющее величину чуть более 1 мм, что является допустимым для анализируемого типа демпфера.

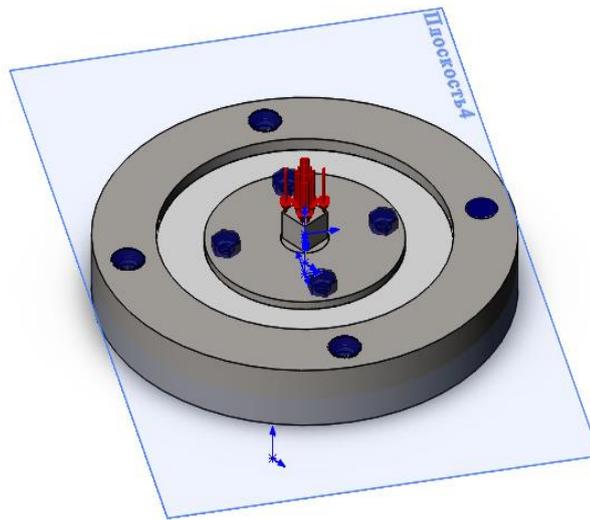


Рис. 4. 3-D модель рабочей части МР демпфера с нагрузкой

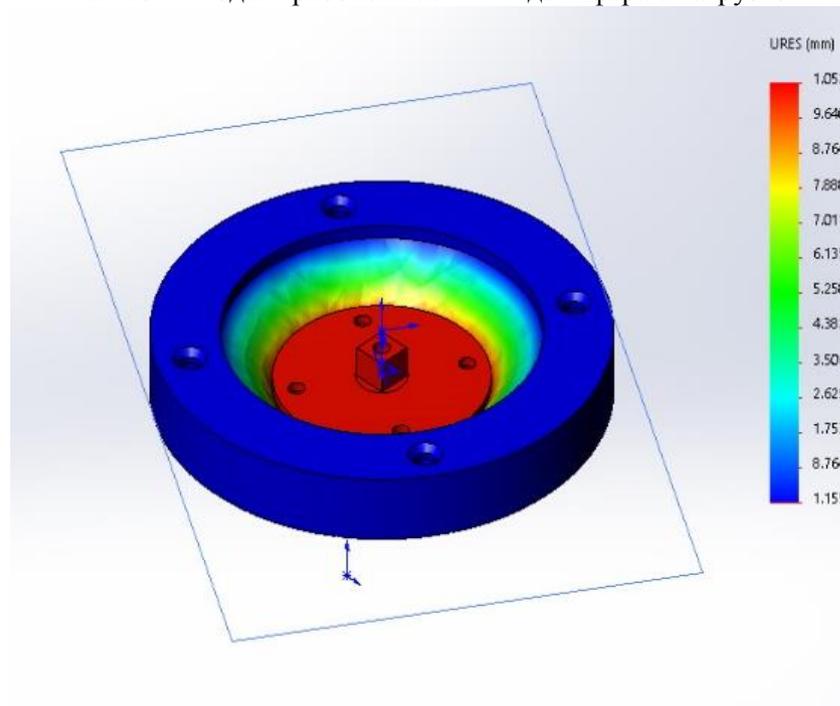


Рис. 5. Статический анализ перемещения

Экспериментальные данные

1. Эксперименты по измерению тока трогания

Схема установки:

Экспериментальная платформа на основе МР демпферов представлена на рис. 6. Платформа состоит из: демпфера – I на основе МР – эластомера и генератора управляющего тока.

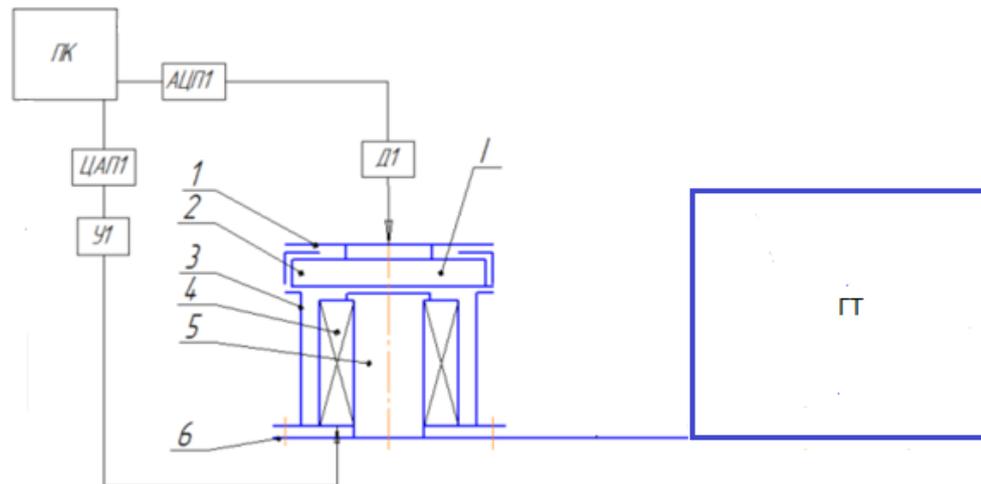


Рис. 6. Схема экспериментального стенда

Этапы процесса:

- 1) Установка демпфера на стенд.
- 2) Установка датчика Д1 в рабочее положение.
- 3) Подача управляющего тока в катушку демпфера.
- 4) Выставление значения тока.
- 5) Снятие показаний.

Сущность процесса:

Ток трогания – минимальное значение управляющего тока в катушке, при котором в эластомере наблюдается заметное перемещение. Знание значения тока трогания важно при настройке платформы для работы в активном режиме виброизоляции. Кроме того, в процессе измерения можно проанализировать как ведёт себя конкретный эластомер при увеличении тока в катушке и, соответственно, магнитного поля, действующего на эластомер. Это важно, поскольку при изготовлении эластомеров есть некоторая погрешность, из-за которой каждый эластомер имеет жёсткость, отличную от предыдущей, и поэтому его поведение в магнитном поле также будет отличаться.

Принцип работы демпфера (поз. I): при подаче управляющего переменного тока в электромагнитную катушку 4 в магнитопроводе возникает замкнутое магнитное поле. В сердечнике 5 формируется радиальное магнитное поле с индукцией. Под действием этой магнитной индукции эластомер 2 начинает деформироваться в направлении воздушного зазора и перемещать мембрану 1. Однако для достижения нужной индукции нужно подать в катушку ток определённого значения, при котором начнётся деформация. Поиск этого значения проводится варьированием тока в катушке от 0,01 А и сравнением его с первоначально измеренным фоном (ток равен 0).

Для оценки значения тока трогания используется критерий Фишера, или F-критерий:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i$$

$$f = n - 1$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{f}$$

$$D = \sqrt{S^2}$$

где D – разброс значений, f – количество степеней свободы соответствующей выборки, S^2 – дисперсии соответствующей выборки, n – количество элементов выборки, x_i – элемент выборки, \bar{x} – среднее значение элементов выборки.

Оценка разброса значений при фоне позволяет определить начальную точку измерений, а также фоновый шум, обуславливающий разброс значений. Если разность среднего значения, измеренного при заданном токе, и среднего значения фона больше разброса при фоне, то это означает, что эластомер деформировался и начал перемещаться, следовательно, при это значение соответствует току трогания.

Обработка результатов (в программной среде Microsoft Excel 2013) (Рис. 7-14).

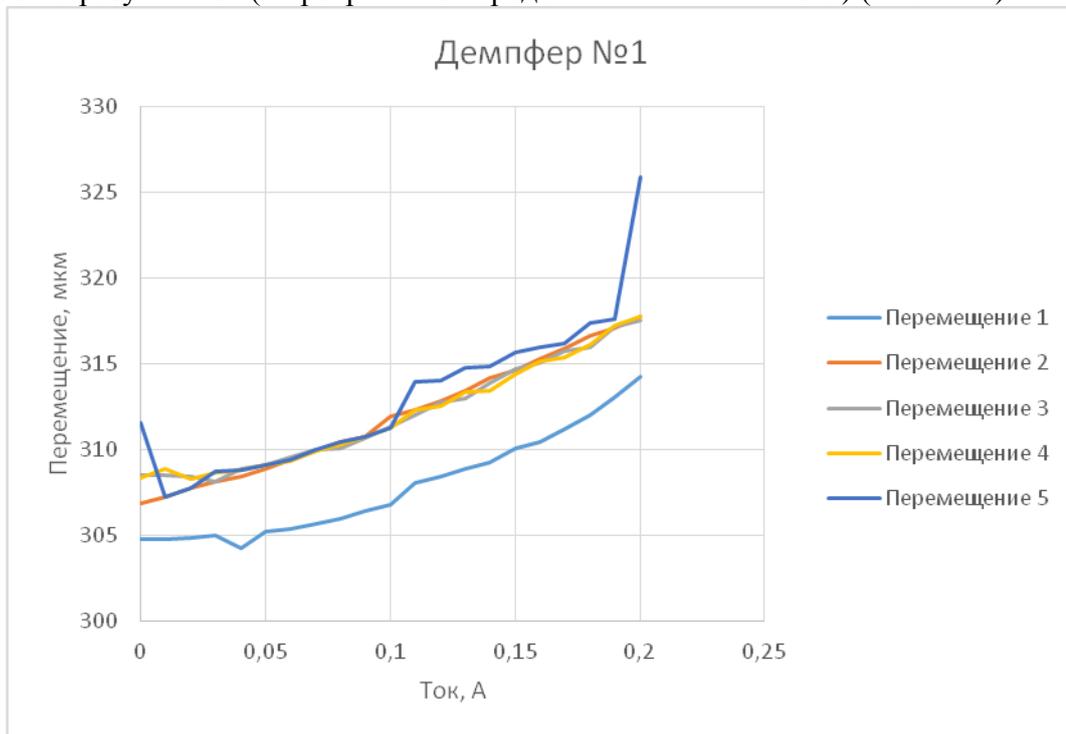


Рис. 7. Графическое представление результатов Демпфера №1

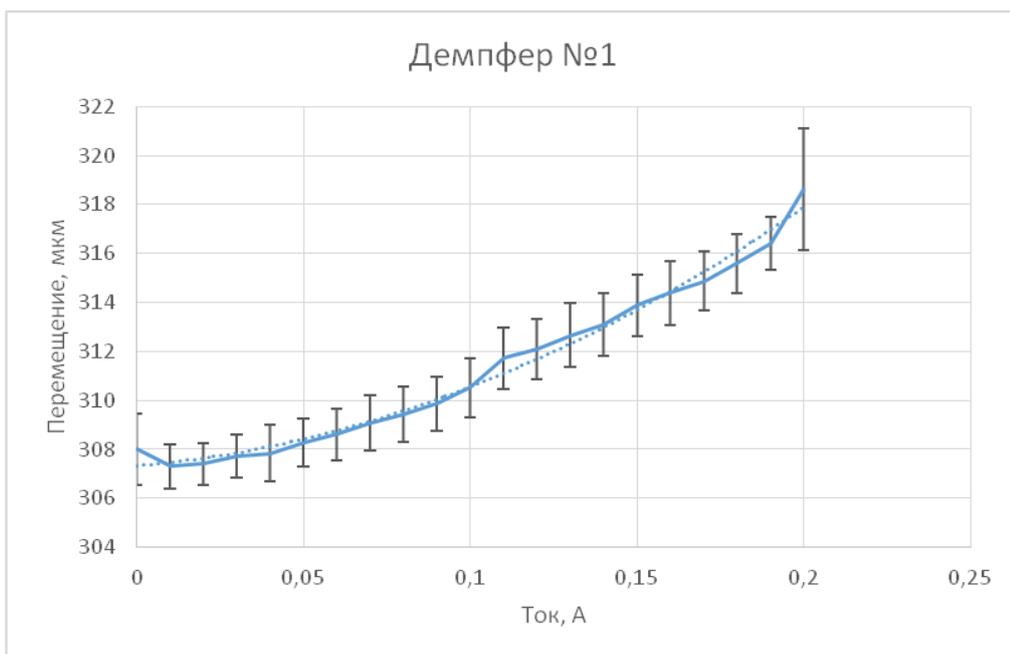


Рис. 8. Обработка результатов эксперимента для Демпфера №1

Вывод: ток трогания равен 0,2 А, т.к. наклон кривой резко меняется.

Демпфер №2.

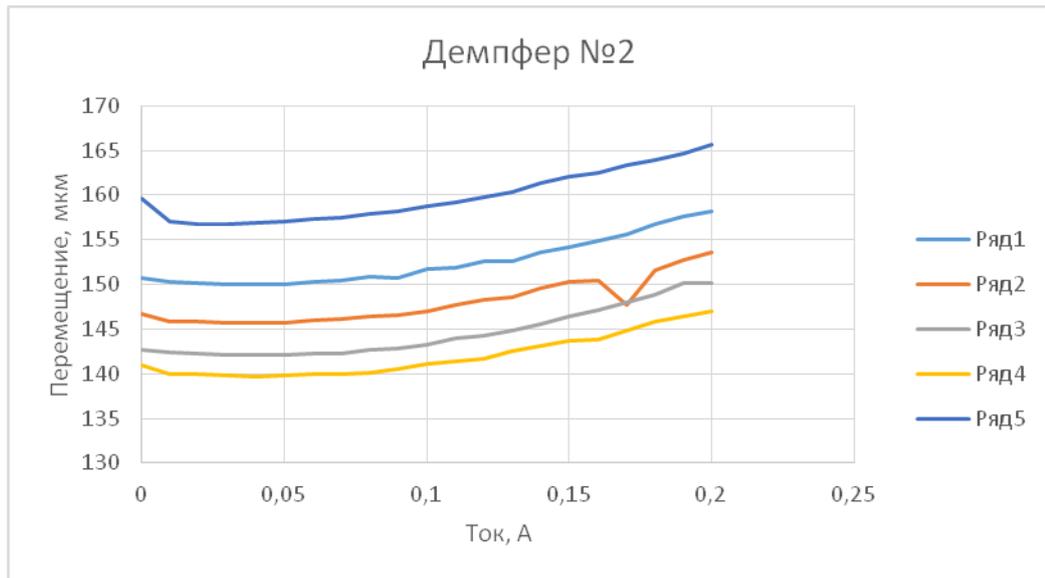


Рис. 9. Графическое представление результатов Демпфера №2

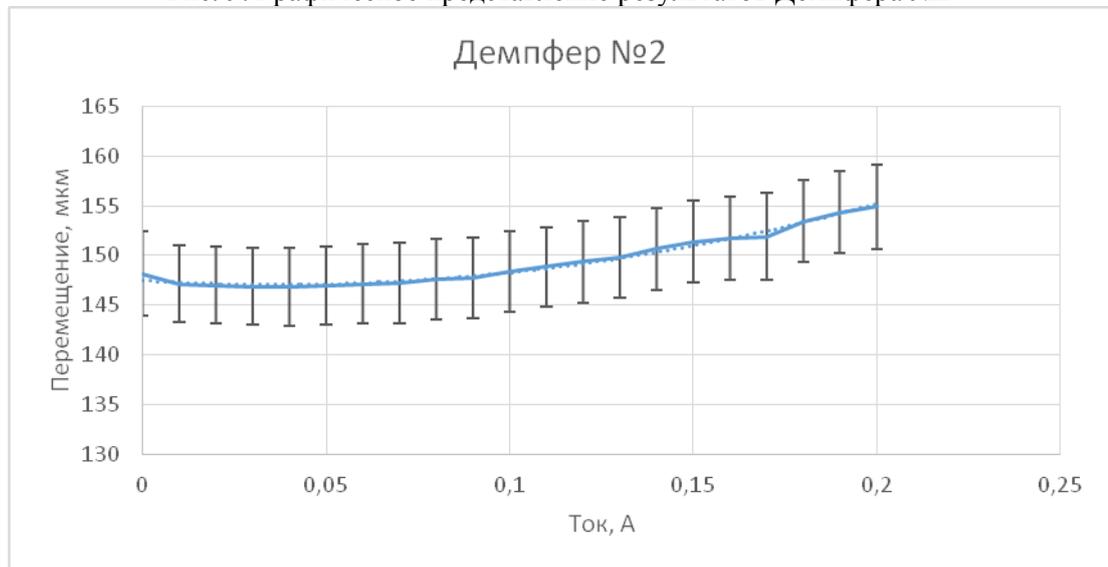


Рис. 10. Обработка результатов эксперимента для Демпфера №2

Вывод: заметного перемещения не наблюдается, поэтому для оценки тока трогания следует провести измерения до 0,4 А.

Демпфер №3.

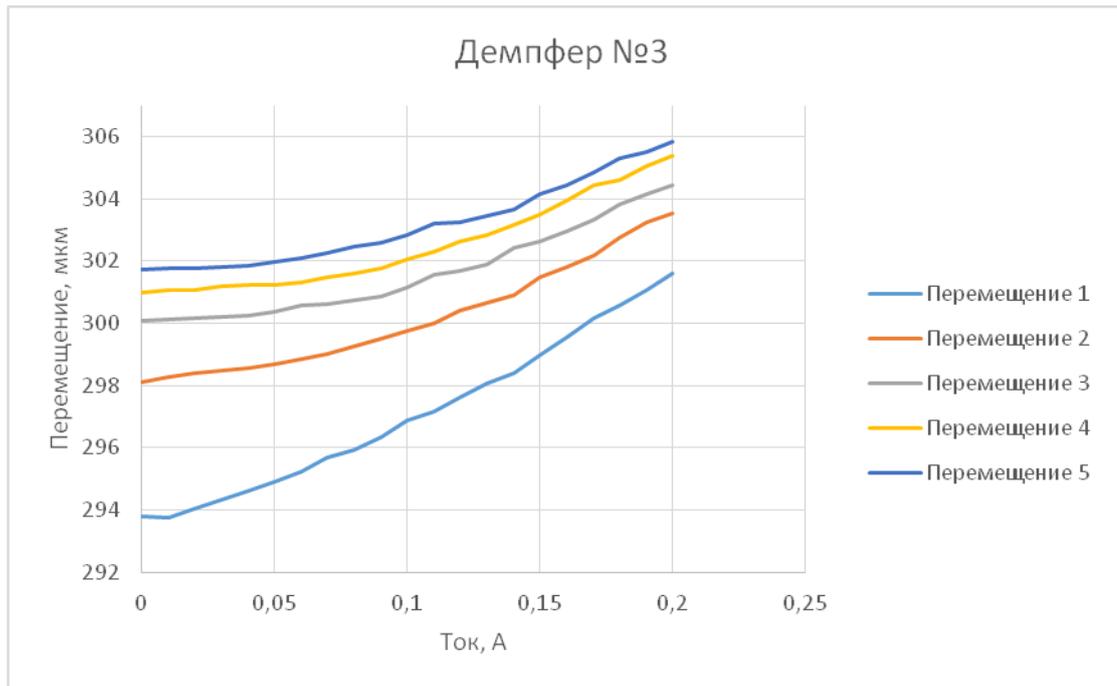


Рис. 11. Графическое представление результатов Демпфера №3

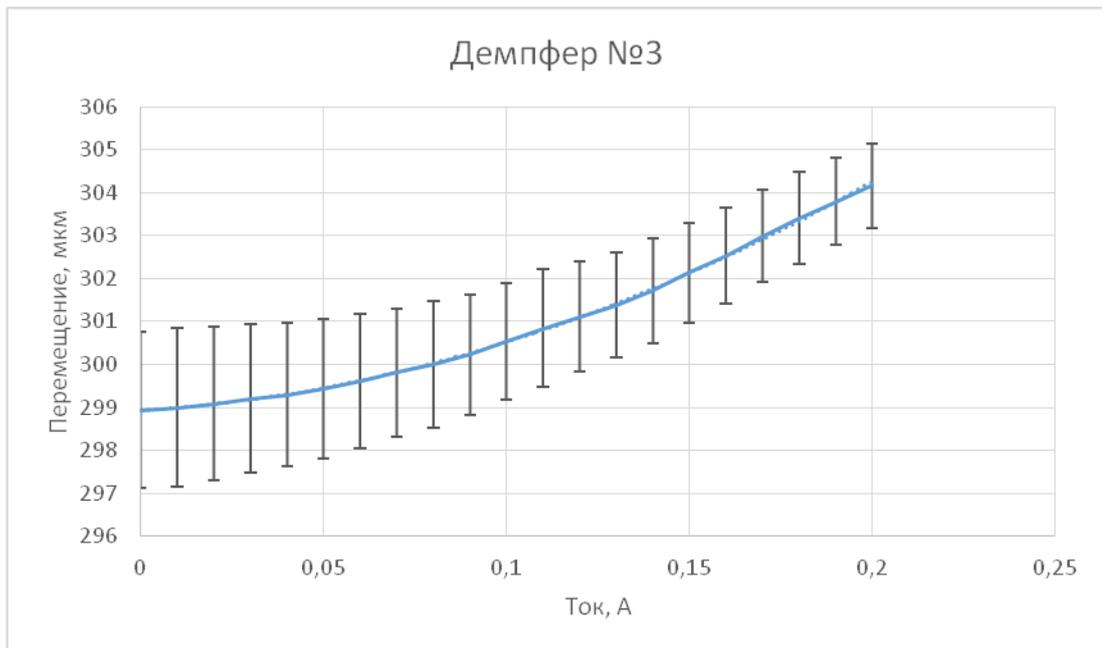


Рис. 12. Обработка результатов эксперимента для Демпфера №3

Вывод

Учитывая характер кривой (довольно крутое восхождение) и доверительные интервалы, ток может находиться в интервале 0,16 – 0,2 А.

Демпфер №4.

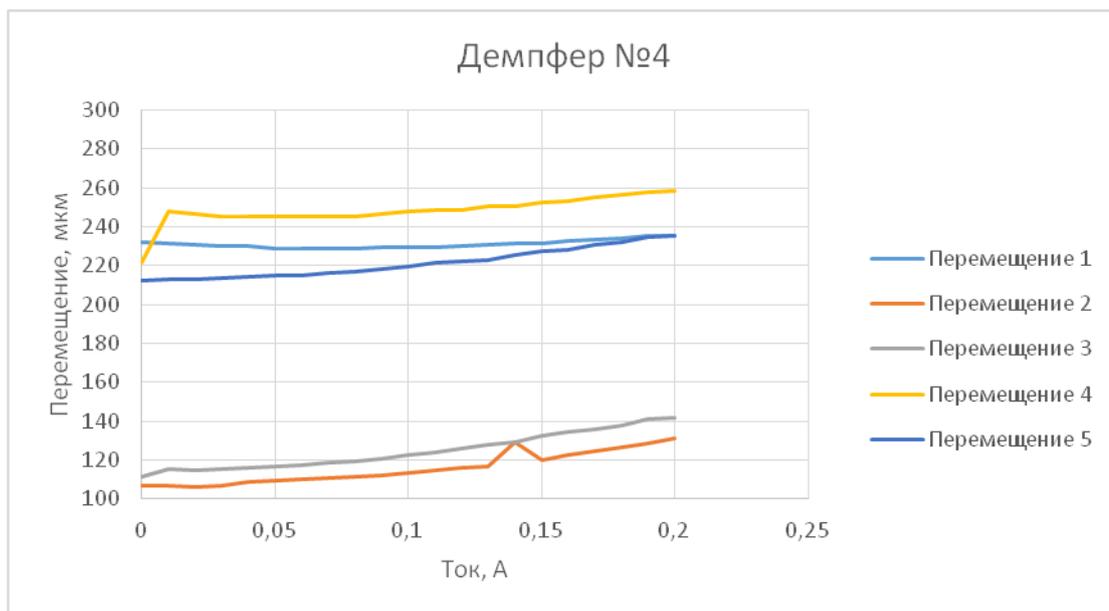


Рис. 13. Графическое представление результатов Демпфера №4

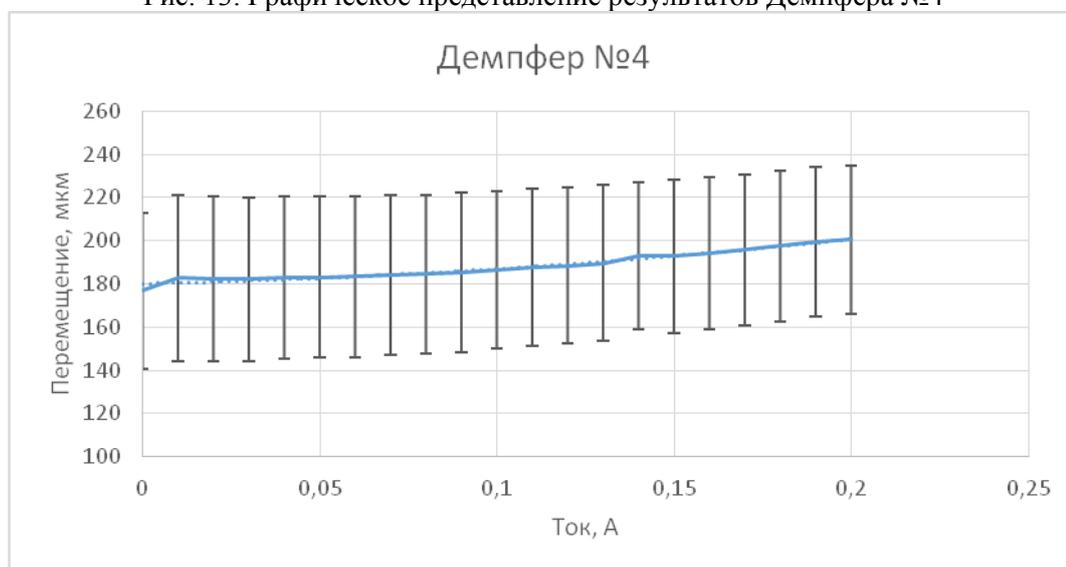


Рис. 14. Обработка результатов эксперимента для Демпфера №4

Вывод

Анализируя таблицы и характер кривой (почти линейная зависимость, практически нет наклона) можно сделать вывод, что ток трогания находится за пределами проведённых измерений, и следует провести измерения до 0,4-0,5 А.

2. Эксперименты по измерению коэффициента передачи амплитуды колебаний

Схема установки:

Экспериментальная платформа на основе МР демпферов представлена на рис. 15. Платформа состоит из: демпфера – I на основе МР – эластомера и датчика вибраций II.

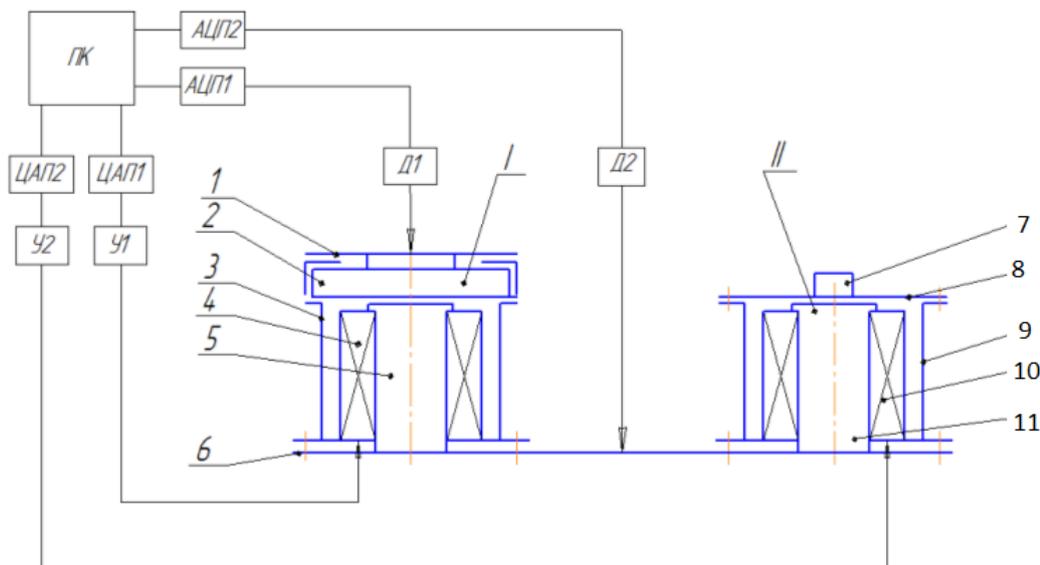


Рис. 15. Схема экспериментального стенда

Этапы процесса:

- 1) Установка платформы на стенд.
- 2) Установка датчиков Д1 и Д2 в рабочее положение.
- 3) Подача управляющего тока в катушку задатчика.
- 4) Выставление значения частоты и амплитуды.
- 5) Снятие показаний.

Сущность процесса:

Коэффициент передачи амплитуды колебаний (КПАК) показывает какой процент колебаний передаётся при вибрациях с основания демпфера на верхний фланец. Этот параметр важен для оценки эффективности работы платформы, т.е. для оценки её демпфирующих свойств:

$$\text{КПАК} = \frac{A_1}{A_0},$$

где A_1 – амплитуда на верхнем фланце, A_0 – амплитуда на основании.

Наиболее желательное значение КПАК должно стремиться к 0,05.

Принцип работы задатчика (поз. II): при подаче управляющего переменного тока в электромагнитную катушку 10 в магнитопроводе возникает замкнутое магнитное поле. В грузе 7 формируется радиальное магнитное поле с индукцией, величина которой имеет максимум вблизи сердечника 11. Под действием этой магнитной индукции груз перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора.

Платформа активной виброизоляции в пассивном режиме гасит вибрации за счёт систем квазинулевой жёсткости – масс-корректоров, а также за счёт жёсткости эластомеров (Рис. 16).

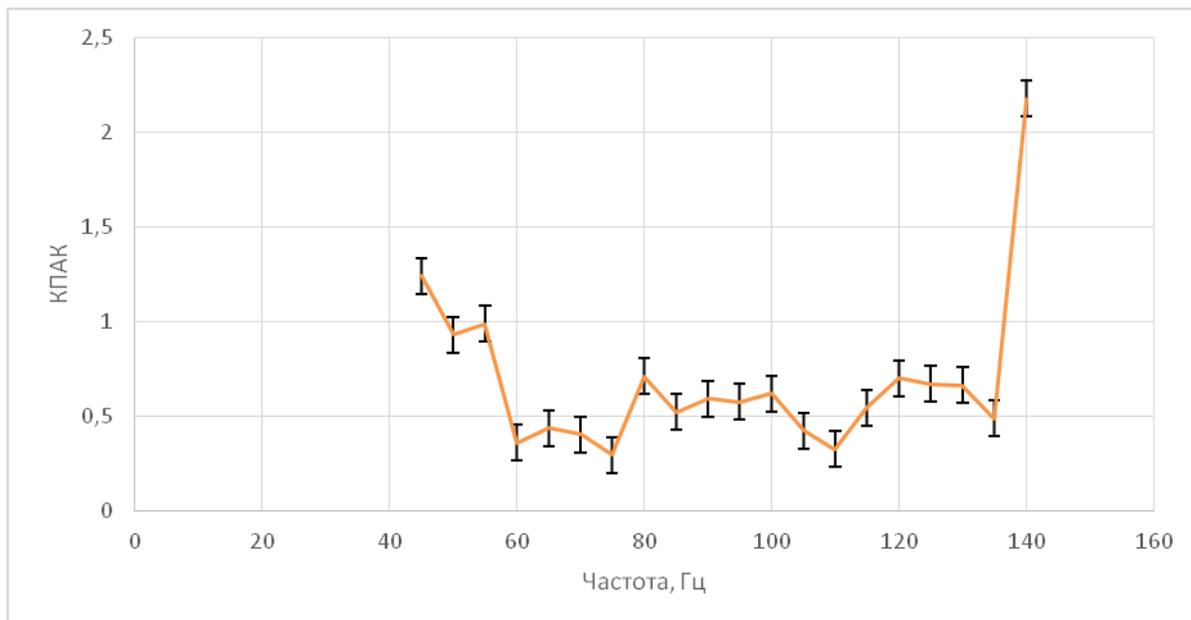


Рис. 16. Графическое представление результатов по КПАК

Вывод

Для диапазона частот 60-140 Гц КПАК Демпфера №1 находится в диапазоне 0,2-0,5. В диапазоне 40-60 Гц КПАК больше, что характерно для более низких частот. В диапазоне 75-80 Гц наблюдается небольшой скачок – возможно в этом диапазоне находится резонансная частота устройства, имеет смысл более тщательно с небольшим шагом изучить эту область. При 140 Гц наблюдается резкий скачок, после чего КПАК устойчиво остаётся больше единицы вплоть до 200 Гц.

Литература

1. *J. D. Carlson и M. R. Jolly*, «MR Fluid, foam and elastomer devices,» *Mechatronics*, 2000, № 10, pp. 555-569.
2. *Kordonsky W.* Magnetorheological effects as a base of new devices and technologies. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 1993, Vol. 122, pp. 395-398.
3. *Борин Д.Ю.* Магнитореологический механизм для позиционирования зеркал сверхбольших астрономических телескопов с нанометровой точностью // Федеральная научно-техническая конференция творческой молодежи России по естественным, техническим, гуманитарным наукам: Материалы конференции. М.: МИЭМ, 2003. С. 115-117.

УДК 621.384.3**ПЛАНАРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ. ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФОТОПОЛИМЕРА EPOSCORE**

Алексей Валерьевич Кузовков ⁽¹⁾, Дарья Михайловна Кузищева ⁽²⁾

Студент 4 курса ⁽¹⁾, студент 4 курса ⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.С. Боброва

ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

В области телекоммуникаций давно намечена тенденция замены электрических соединений оптическими. Оптоволокно в этом случае используется для организации связи между устройствами. Подобный переход позволяет значительно увеличить полосу пропускания канала связи. Данное преимущество оптических соединений, а также отсутствие перекрёстных помех и низкие потери сигнала обуславливают следующий шаг интеграции оптики и электроники - создание оптических шин для реализации связей между узлами одного устройства. С примером подобной шины можно ознакомиться в работе [5]. Следующий уровень – использование планарных оптических волноводов (далее - ОВ) в качестве межсоединений в печатных платах и гибридных интегральных схемах. Совместно с уже перечисленными достоинствами ОВ отсутствие тепловыделения определяет перспективы их использования в теплонагруженных коммутационных платах. Подробное описание преимуществ оптических межсоединений приводится в работе [3].

Недостатком оптических линий связи является необходимость использования источников и приёмников излучения. В случае внешнего подвода сигнала источником может служить лазерный диод, при необходимости размещения источника непосредственно на плате используют поверхностно излучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL). VCSEL представляет собой элемент, монтируемый по технологии флип-чип и имеющий габариты в среднем 200x200x150 мкм. Диаметр активной области лазера составляет 10 мкм, а угол расхождения пучка, как правило, не превышает 20°. Чаще используются не одиночные источники, а их массивы по 4 и 12 элементов. В качестве приёмников излучения используют фотодиоды и их массивы.

Следует отметить, что вместо источников излучения на плате могут применяться устройства, модулирующие внешний общий сигнал.

Планарный ОВ представляет собой канал (ядро) прямоугольного сечения, сформированный внутри оптически менее плотного материала (оболочки). Световой сигнал распространяется в канале за счёт полного внутреннего отражения от поверхности раздела ядро/оболочка (Рис.1). Роль оболочки может играть воздух, поскольку его коэффициент преломления меньше чем у любого оптического материала.

Распространение света в волноводе

Геометрическая оптика допускает распространение луча под любым углом к оси волновода в пределах определённого диапазона. Более точный анализ на основе волнового

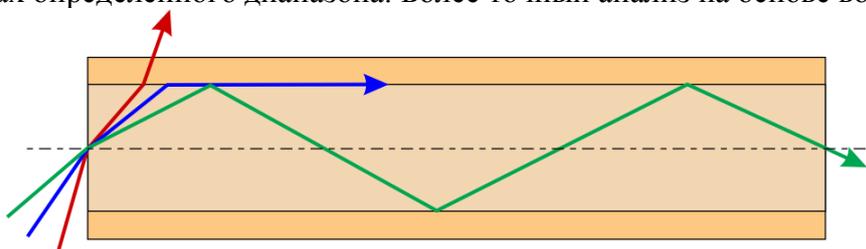


Рис. 1. Распространение света в оптическом волноводе

подхода показывает, что лучи в волноводе могут распространяться не под любым углом к оси, а только под углами, удовлетворяющими условию конструктивной интерференции [4]. Это означает, что после двух отражений волна должна воспроизвести сама себя (Рис.2). Лучи, распространяющиеся под углами, удовлетворяющими условию конструктивной интерференции, называются волноводными модами. Только для этих лучей распределение интенсивности не меняется вдоль волокна.

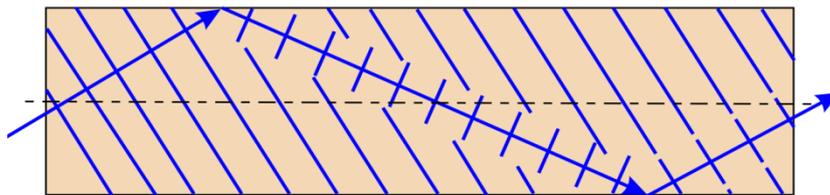


Рис. 2. Волновая мода

Ключевым фактором при передаче сигнала по оптическому каналу является дисперсия – расширение импульса. Выделяют три вида дисперсий: межмодовая, хроматическая и поляризационная модовая. Моды разных порядков, одновременно вошедшие в волновод, преодолевают различные расстояния (рис.3), из-за чего попадают на приёмник с разной задержкой. Так возникает межмодовая дисперсия. Очевидно, проблема решается использованием одномодовых волноводов, характерные размеры сечения для которых не превышают 5 мкм.

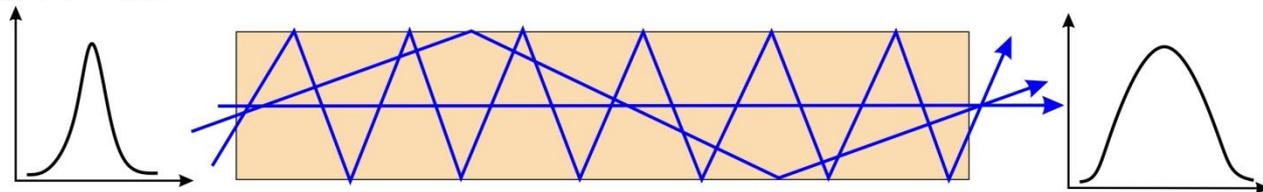


Рис. 3. Межмодовая дисперсия

Хроматическая дисперсия возникает из-за различия скоростей разных спектральных компонент светового сигнала и зависит от ширины спектра входного импульса. Таким образом, для снижения хроматической дисперсии необходимо использовать узкополосные источники излучения.

Физическая природа поляризационной модовой дисперсии заключается в различии скоростей распространения поляризационных компонент одной моды (рис. 4). Как видно, данный вид дисперсии характерен даже для одномодовых волноводов.

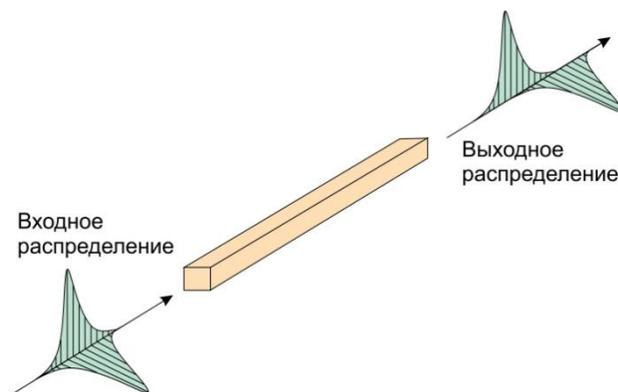


Рис. 4. Поляризационная модовая дисперсия

Следует отметить, что ОВ имеют большие потери по сравнению с оптоволокном. Волоконно-оптические линии связи имеют потери не более 1 Дб/км, в то время как полимерные планарные волноводы – от 0.2 до 1 Дб/см. Такие высокие значения потерь в планарных волноводах обусловлены в первую очередь прямоугольной формой поперечного сечения. Также вносит вклад несовершенство поверхности контакта ядро/оболочка.

Реализация оптических межсоединений

В изделиях интегральной оптики материалами волноводов служат полупроводниковые и металлические (для плазмонных волноводов) плёнки, стёкла, оптические ситаллы и композитные материалы [2]. Сами волноводы при этом изготавливаются методом

фотолитографии. В изделиях же электроники устанавливается строгое требование: материалы как ядра, так и оболочки оптического канала должны быть диэлектриками.

Наиболее перспективными материалами для реализации обозначенной цели являются фоточувствительные полимеры. В случае их применения, отпадает необходимость в использовании фоторезиста при проведении фотолитографии – экспонируются и проявляются непосредственно сами полимеры. Их главные недостатки – низкая термическая устойчивость и высокий коэффициент термического расширения. Примером таких материалов являются негативные фотополимеры EpoCore и EpoClad компании Microresist technology. Их свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства полимеров EpoCore и EpoClad

Коэффициент преломления ($\lambda=830$ нм)	EpoCore 1.58 EpoClad 1.57
Температура стеклования	$>180^{\circ}\text{C}$
Потери ($\lambda=830$ нм)	0.2 Дб/см
КТР	$50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Приведём в общих чертах технологический процесс формирования волноводов на основе этих полимеров (Рис5). На подложку центрифугированием наносится слой EpoClad, после чего сушится и экспонируется по всей площади. Те же действия производятся со слоем EpoCore, но на этапе экспонирования формируется топология волноводов. Производится проявка топологии, не засвеченные области удаляются растворителем mr-Dev 600. Затем формируется верхний слой EpoClad.

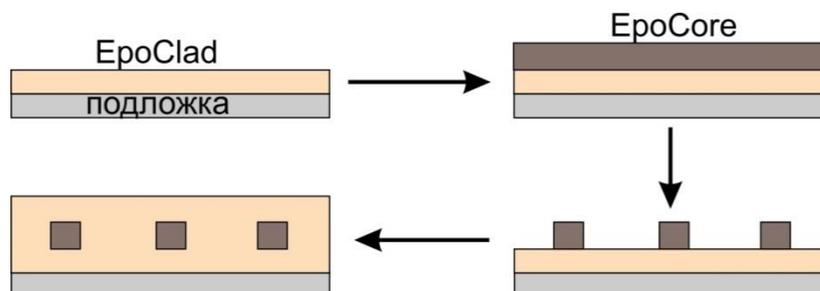


Рис. 5. Формирование планарных оптических волноводов

Пример конструктивного исполнения гибридной интегральной схемы с оптическими межсоединениями приведён на рисунке 6. Линейные размеры указаны в микрометрах. Данная конструкция имеет два уровня электрической коммутации. Нижний уровень 4 содержит только медные проводники, в то время как верхний уровень 5 наряду с проводниками включает активные и пассивные компоненты. Роль межслойного диэлектрика выполняет толстый слой EpoClad 2, являющийся также оболочкой оптических каналов 3. Связь между слоями коммутации осуществляется через столбики гальванической меди, сформированные в слое EpoClad. В качестве излучателя установлен массив VCSEL 6. Каждый элемент массива имеет два вывода, один из которых общий. Сигнал, генерируемый лазером, распространяется в вертикальном направлении, отражается от тонкой плёнки алюминия 8 и направляется в волновод 3. В конце волновода световой поток снова меняет направление и регистрируется фотодиодом 7.

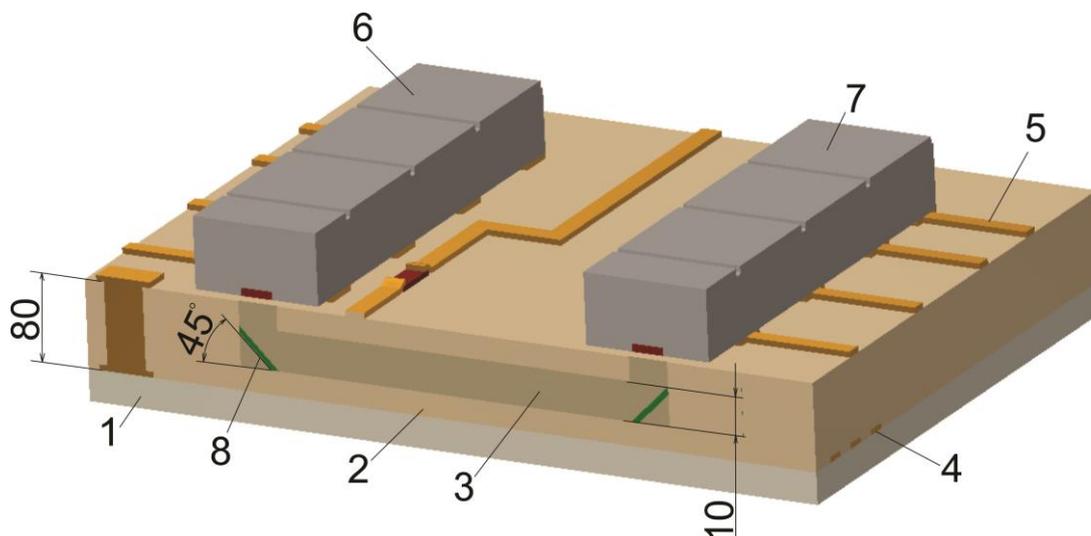


Рис. 6. Гибридная интегральная схема с оптическими межсоединениями

Как видно, полная замена медных проводников планарными ОВ в подобной конструкции не представляется возможной, так как требуется как минимум управление источниками излучения. В перспективе ожидаются разработки оптоэлектронных полупроводниковых интегральных схем, содержащих VCSEL в интегральном исполнении. Подобные разработки позволят соединять микросхему непосредственно с оптическим каналом, без промежуточных медных соединений.

Оценка разрешающей способности фотополимера EpiCore

Целью эксперимента было определение оптимальных технологических режимов формирования волноводов. В качестве параметра, количественно характеризующего качество волноводов, была выбрана разрешающая способность. Очевидно, что наибольшее влияние на данный параметр оказывают режимы технологических операций, связанных с обработкой слоя EpiCore. В связи с этим целесообразно провести эксперимент, направленный на построение математической модели данных операций и их последующую оптимизацию.

В качестве варьируемых факторов были приняты доза экспонирования и время проявления EpiCore. При завышенной дозе (времени) экспонирования рассеянное актиничное излучение, проникающее под темные области фотошаблона, вызывает полимеризацию данных участков, что препятствует их дальнейшему проявлению. При заниженной дозе экспонирования фоторезист экспонируется не на всю глубину. Оба указанных случая демонстрируют причины искажения профиля ОВ.

При проявлении важно проявить неэкспонированные участки фотополимера на всю глубину, сохранив при этом форму экспонированных. На основании вышесказанного можно сделать вывод о необходимости нахождения оптимального сочетания выбранных факторов.

Оборудование, использованное в эксперименте:

- ракель;
- термостол;
- установка контактного экспонирования AZ210 Mega Electronics;
- кювета пластиковая.

Средство контроля: цифровой оптический микроскоп KS-is DigiScope II.

Материалы:

- фотополимер EpiCore;
- Проявитель mr-Dev 600.

В ходе эксперимента ОВ формировались на ситалловых подложках (60x48 мм) с предварительно нанесённым, высушенным и проэкспонированным слоем EpiClad. Опишем порядок действий.

- 1 Нанесение Еросоге ракелем (толщина слоя в диапазоне 30-50 мкм).
- 2 Релаксация 15 мин.
- 3 Предэкспозиционная сушка на термостоле 50°C (5 мин), нагрев до 85°C (2 мин), 85°C (10мин).
4. Экспонирование (в соответствии с выбранными уровнями варьирования).
5. Постэкспозиционная сушка на термостоле 50°C (5 мин), нагрев до 90°C (2 мин), 90°C (10мин).
6. Погружное проявление в растворителе mr-Dev 600 (в соответствии с выбранными уровнями варьирования). В процессе проявления растворённый резист удаляется с поверхности кистью (Рис. 7).
7. Сушка на термостоле 120°C – 15 мин (Рис/ 8).

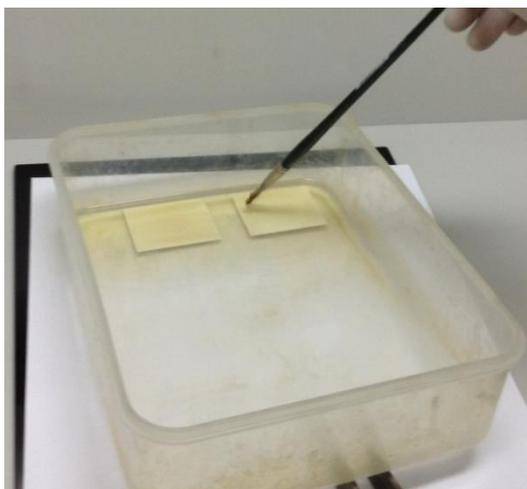


Рис. 7. Проявление



Рис.8. Сушка

Уровни варьирования факторов приведены в таблице 2. Один из полученных образцов показан на рисунке 9. Результаты, полученные в ходе эксперимента, продемонстрированы на рисунке 10.

Таблица 2. Уровни варьирования входных параметров

Доза экспонирования, мДж/см ²	60	20	80
Время проявления, с	20	50	80

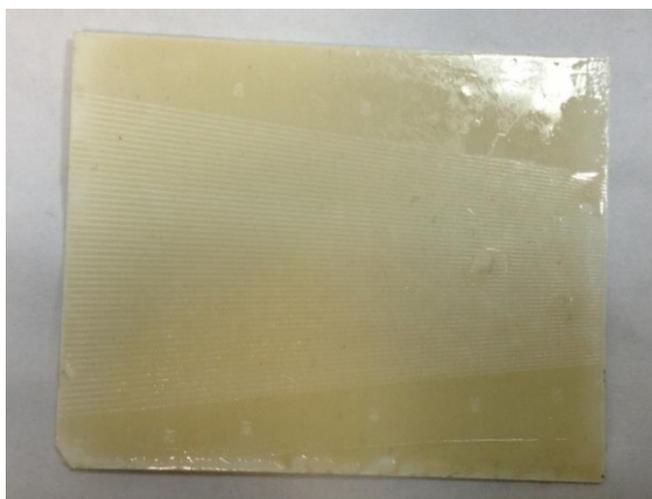


Рис. 9. Волноводы на ситалловой подложке

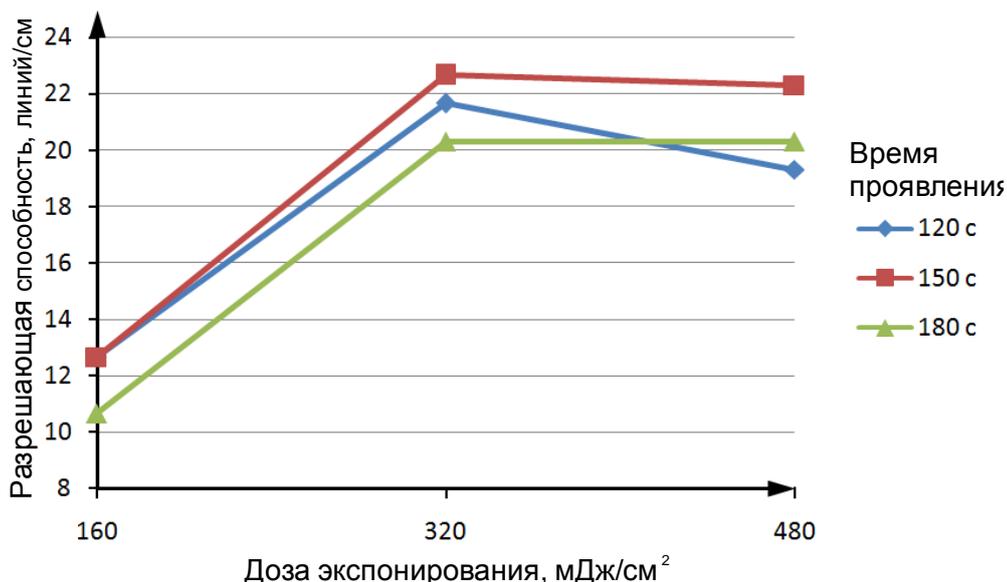


Рис.10. Зависимости разрешения от дозы экспонирования на установке AZ210 Mega Electronics для различных времён проявления

Полученные данные показывают, что независимо от времени проявления пик разрешения наблюдается при экспонировании в течение 160 с. Это говорит о том, что при меньших значениях времени экспонирования, дозы излучения недостаточно для полимеризации Еросоге на всю глубину, а при больших – полимеризуются затенённые участки. При этом наилучшие результаты наблюдаются при проявлении в течение 150 с. Ухудшение разрешения при изменении времени проявления вызвано «перетравом» и «недотравом» для 180 и 120 с соответственно.

На основе полученных результатов была составлена математическая модель:

$$Y(X_1, X_2) = 23.08 + 4.33X_1 - 5.49X_1^2 - 1.99X_2^2,$$

где X_1 и X_2 – доза экспонирования и время проявления в безразмерном виде соответственно. Средние значения уровней варьирования факторов соответствуют нулям (табл.2), крайние – плюс и минус единицам.

Математическая модель, предсказывает возможность получения максимального разрешения 24 линии/см при режиме: доза экспонирования – 384 мДж/см², время проявления – 150 с. Но даже при достижении теоретически предсказанного разрешения ширина волновода составляет сотни микрометров, в то время как для устранения межмодовой дисперсии требуется ширина в единицы мкм. Для достижения большего разрешения необходимо использовать более совершенные средства нанесения покрытий чем ракель, а также оборудование, обеспечивающее надёжный прижим фотошаблона к заготовке.

Заключение

Проведённый эксперимент определяет область оптимальных технологических режимов формирования волноводов. Однако для реализации полноценных устройств требуется решение ряда других технологических проблем, таких как адгезия металлических плёнок к полимерам, согласование термических коэффициентов расширения, формирование переходных отверстий между слоями коммутации. Задача преодоления вышеуказанных трудностей определяет вектор дальнейших исследований в данной области.

Литература

1. Б. Салех, М. Тейх. Оптика и фотоника. Принципы и применения. Пер. с англ.: Учебное пособие. В 2 т. Т. 2/ Б. Салех, М. Тейх – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. – 784 с.
2. А.И. Сидоров, Н.В. Никонов. Материалы и технологии интегральной оптики. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 107 с.
3. М. Белкин, А. Сигов. Оптические межсоединения в интегральных схемах // Наноиндустрия. – 2012. - №1. – С. 8-14.
4. О.Е. Наний. Основы цифровых волоконно-оптических систем связи // Lightwave Russian edition. – 2003. - № 1. С. 48-52.
5. Nikolaos Bamiedakis, Aeffendi Hashim, Richard V. Penty, Ian H. White. A 40 Gb/s Optical Bus for Optical Backplane Interconnections// Journal of lightwave technology. - 2014. - №8. – С. 1526-1537.

УДК 621.793.182

МОНТАЖ И ЗАПУСК ЖИДКОФАЗНОГО МАГНЕТРОНА НМСА-50 НА УСТАНОВКЕ МВТУ-11-1

Мария Владимировна Макарова⁽¹⁾, Александр Сергеевич Бабурин⁽²⁾

Студент 3 курса⁽¹⁾, студент 6 курса⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.М. Моисеев

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

Одним из способов нанесения тонких пленок является метод ионного распыления в магнетронных системах с жидкой мишенью. Этот метод отличается высокой скоростью осаждения, которая на порядок выше, чем у магнетронов с твердой мишенью, высокой энергетической эффективностью, а также высокими показателями чистоты и адгезии.

В отличие от обычного магнетрона, в жидкофазном в качестве мишени используется металл в тигле, изолированный от системы охлаждения и нагреваемый до температуры плавления под воздействием ионов плазмы. Скорость осаждения в данном случае складывается из двух факторов: испарения и распыления. При высоких температурах процесс испарения становится доминирующим. Энергию, идущую на нагрев мишени, не нужно отводить из катодного узла системой охлаждения, что позволяет значительно увеличить мощность, вкладываемую в разряд.

Для реализации данного метода нанесения на вакуумной установке МВТУ-11-1 в лаборатории кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ОАО «НИИТМ» разработан и изготовлен жидкофазный магнетрон НМСА-50. Целью данной работы является монтаж магнетрона и отработка режимов зажигания разряда и стабильной работы магнетрона.

Описание оборудования

В тигель, высотой 3,75 мм, установленный на керамических подкладках, высотой 2 мм, загружается мишень высотой 2 мм.

Тигель изготовлен из тугоплавкого материала – молибдена, поскольку магнетрон с жидкой фазой работает при очень высоких температурах – температурах плавления мишеней.

Магнетрон смонтирован на вакуумной установке МВТУ-11-1 (рис. 2).

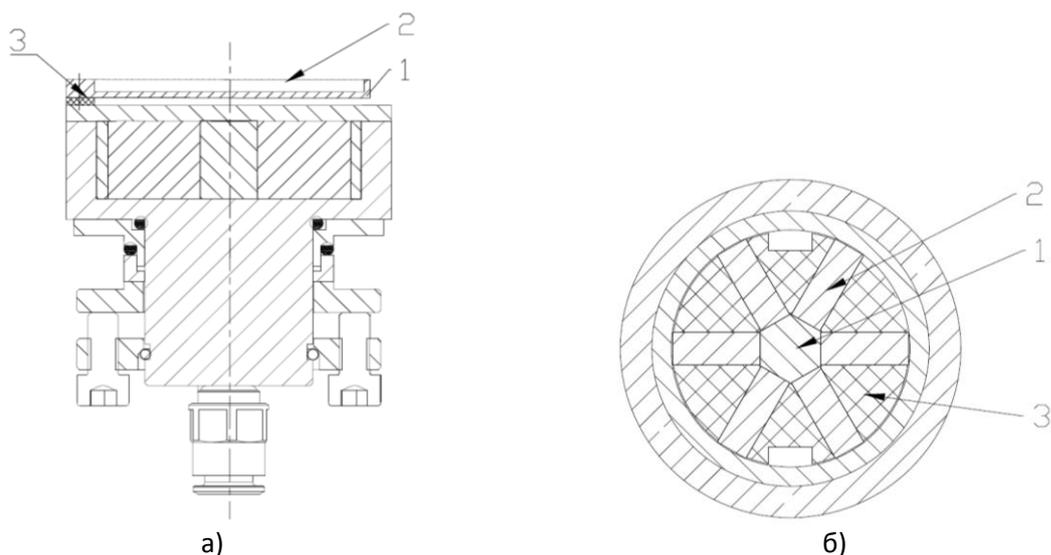


Рис. 1. Жидкофазный магнетрон НМСА-50: а) 1 – тигель; 2 – место под мишень; 3 – диэлектрические прокладки; б) 1 – магнитовод; 2 – магниты; 3 – изолятор

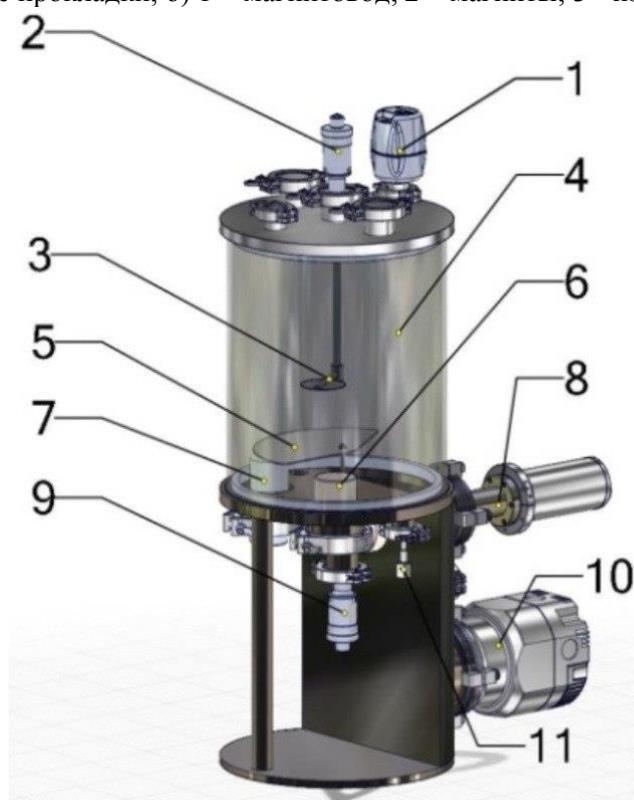


Рис. 2. Установка МВТУ-11-1: 1 – датчик вакуума широкодиапазонный; 2 – ввод вращения подложкодержателя; 3 – подложкодержатель; 4 – вакуумная камера; 5 – заслонка; 6 – магнетрон; 7 – источник ионов; 8 – электронно-лучевой испаритель; 9 – ввод вращения заслонки; 10 – турбомолекулярный насос; 11 – порт напуска газа

Жидкофазный магнетрон НМСА-50 устанавливается на позиции 6. Для предотвращения осаждения материала мишени при ее распылении на внутреннюю поверхность камеры устанавливается специальный экран.

Проведение экспериментов

Был проведен ряд экспериментов по запуску магнетрона с различной вариацией условий запуска. Зажигание разряда магнетрона проводился при работе по опорному напряжению. Стандартный диапазон напряжений зажигания разряда магнетрона 500-600 В. Для питания магнетрона использовался блок АРЕL-M-5PDC мощностью до 5 кВт. Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Так как не получилось найти режим стабильной работы магнетрона при данном давлении с установленным тиглем, было решено повысить давление в камере. Для этого была изготовлена заслонка, для повышения давления (рис.5). Максимально возможное давление с заслонкой 1,2 Па. Данные экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 1. Данные экспериментов по запуску магнетрона НМСА-50

№	Тигель	Экран	Мишень	Источник ионов	Давление в камере, мбар	Напряжение, В	Результат
1	Установлен. Закреплен винтами через диэлектрические прокладки	-	-	Выкл.	$1,9 \cdot 10^{-3}$	500	Разряд не зажигается
					$2,6 \cdot 10^{-3}$	500	Разряд не зажигается
				Вкл. (Макс. ток)	$2,6 \cdot 10^{-3}$	500	Одиночная дуга
					$3 \cdot 10^{-3}$	500	Множественные дуги по периметру. Нестабильная работа ИИ.
2	Установлен. Закреплен винтами через диэлектрические прокладки	+	-	Выкл.	$1,9 \cdot 10^{-3}$	500	Разряд не зажигается
					$1,9 \cdot 10^{-3}$	600	
				Вкл.	$1,9 \cdot 10^{-3}$	500	
					$1,9 \cdot 10^{-3}$	600	
				Выкл.	$2,6 \cdot 10^{-3}$	500	
					$2,6 \cdot 10^{-3}$	600	
				Вкл.	$2,6 \cdot 10^{-3}$	500	
					$2,6 \cdot 10^{-3}$	600	
3	Отсутствует	+	-	Выкл.	$1,9 \cdot 10^{-3}$	600	Зажега. Горел до понижения напряжения до 350 В
4	Установлен. Закреплен винтами, без диэлектрических прокладок.	+	-	Выкл.	$1,9 \cdot 10^{-3}$	500	Разряд не зажигается
					$1,9 \cdot 10^{-3}$	600	
				Вкл.	$1,9 \cdot 10^{-3}$	500	
					$1,9 \cdot 10^{-3}$	600	
				Выкл.	$2,6 \cdot 10^{-3}$	500	
					$2,6 \cdot 10^{-3}$	600	
				Вкл.	$2,6 \cdot 10^{-3}$	500	
					$2,6 \cdot 10^{-3}$	600	
5	Установлен. Без диэлектрических	-	-	Выкл.	$1,9 \cdot 10^{-3}$	500	Разряд не зажигается
					$1,9 \cdot 10^{-3}$	600	
				Вкл.	$1,9 \cdot 10^{-3}$	500	
					$1,9 \cdot 10^{-3}$	600	

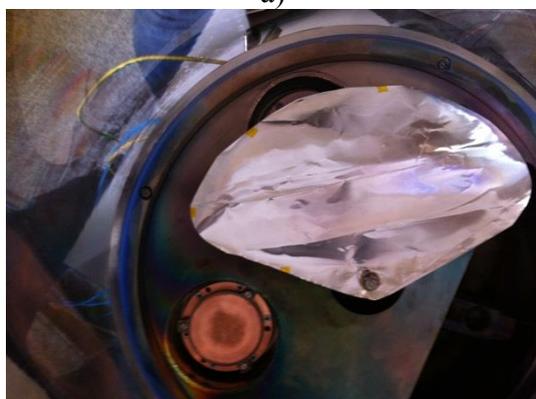
	прокладок.			Выкл.	$2,6 \cdot 10^{-3}$	500	
				Вкл.	$2,6 \cdot 10^{-3}$	600	
				Выкл.	$1,9 \cdot 10^{-3}$	600	
6	Отсутствует	+	Толщина 5 мм Cu	Выкл.	$2,6 \cdot 10^{-3}$	600	Разряд не зажигается
				Вкл.	$2,6 \cdot 10^{-3}$	600	
				Выкл.	$3 \cdot 10^{-3}$	600	
				Вкл.	$3 \cdot 10^{-3}$	600	
7	Отсутствует	+	Толщина 2 мм Cu	Выкл.	$1,9 \cdot 10^{-3}$	600	Резко зажегся, вспыхнул, погас
					$1,9 \cdot 10^{-3}$	500	Зажегся, искрил
					$1,9 \cdot 10^{-3}$	400	Стабильно горел, при понижении напряжения до 375 погас



а)



б)



в)

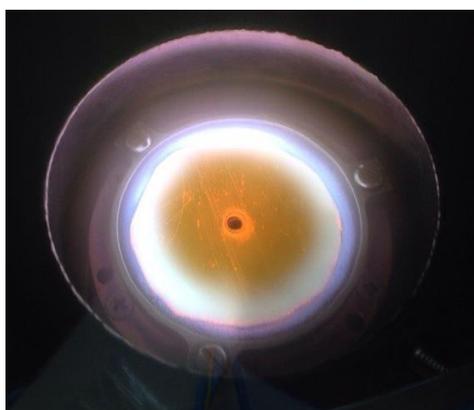


г)

Рис. 5. Камера с установленной заслонкой.
а), в) – заслонка закрыта; б), г) – заслонка открыта

Таблица 2. Результаты экспериментов при новых значениях давления

№	Тигель	Экран	Мишень	Параметра разряда	Результат
1	Установлен. Закреплен винтами через диэлектрические прокладки	+	Cu 2мм	Различные вариации	-
2	Установлен. Закреплен винтами через диэлектрические прокладки	-	Cu 2 мм		-
3	Установлен. Прокладки заменены на кусок поликора толщ. 5мм по центру тигля	-	- Cu 2 мм		Зажегся Зажегся
4	Установлен. Винты и прокладки отсутствуют.	-	Cu 0,5 мм	$Q_{Ar} = 20$ sccm $P = 0.8$ Па $U = 650$ В И.И. - включен	Зажегся, расплавил мишень. Рис. 6
5	Установлен. Винты и прокладки отсутствуют.	-	Cu 1 мм	$Q_{Ar} = 28$ sccm $P = 1,2$ Па $U = 650$ В И.И. - включен	Зажегся, но не вышел на режим. Хуже, чем при 0,5 мм. Рис. 6.



а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Расплавление мишеней магнетрона: а) и б) – толщиной 0,5 мм, в) и г) – толщиной 1 мм

Результаты и выводы

Магнетрон НМСА-50 был смонтирован на установку МВТУ-11-М и запущен. Магнетрон стабильно горит при толщине мишени 0,5 мм с параметрами процесса $Q_{Ar} = 20 \text{ sccm}$, $P = 0,8 \text{ Па}$, $U = 650 \text{ В}$ при включенном источнике ионов. С помощью жидкофазного магнетрона НМСА-50 было реализовано нанесение тонкой пленки из меди в режиме распыления твердой мишени.

Для того чтобы стабильно работать с толщинами мишени 2 мм и более, а, тем более, расплавить мишень, вероятно, недостаточна величина магнитного поля системы на необходимой высоте.

Причинами этого могут являться:

- Недостаточные парамагнитные свойства материала тигля;
- Неэффективная магнитная система.

Вследствие чего возникает необходимость моделирования имеющейся магнитной системы и выбор альтернативной замены, с их последующим сравнением.

Литература

1. <http://apelvac.com/f/37/92/Manual%20APEL-M-3PDC.pdf>
2. Войнов Р.Ю., Третьяков Р.С., Талаева Ю.С. Исследование энергопотребления диодных распылительных систем с твердым и жидким катодом / — Томский политехнический университет, 2009
3. А. И. Кузьмичев. Магнетронные распылительные системы /— М.: Из-во «Аверс», 2008

УДК 621.793.182

МОНТАЖ И ЗАПУСК ЖИДКОФАЗНОГО МАГНЕТРОНА НМСА-50 НА УСТАНОВКЕ МВТУ-11-1

Мария Владимировна Макарова⁽¹⁾, Александр Сергеевич Бабурин⁽²⁾

Студент 3 курса⁽¹⁾, студент 6 курса⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.М. Моисеев

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Для устойчивого горения разряда на поверхности мишени в магнетронных распылительных системах требуется величина магнитного поля больше некоторого критического значения, которое зависит от конструкции магнетрона. Это тем более актуально для магнетронов с жидкофазной мишенью, поскольку на начальных стадиях требуется расплавить материал в тигле, изолированном от поверхности катода магнетрона.

Отработка режимов жидкофазного магнетрона НМСА-50 (рис. 1), смонтированного на вакуумной установке МВТУ-11-1, показала нестабильную работу магнетрона даже в режиме работы с твердой мишенью. Возможные причины – неэффективность магнитной системы, вследствие чего не достигается достаточная величина магнитного поля, и ослабление поля вследствие свойств материала тигля.

Работа жидкофазного магнетрона НМСА-50 была нестабильной. Это могло произойти из-за:

- Недостаточных парамагнитных свойств материала тигля;
- Неэффективной конфигурации магнитной системы;
- Слабой величины магнитной силы постоянных магнитов.

В данной статье рассмотрены и проанализированы все три предположения.

Проверка влияния на магнитное поле материала тигля

Тигель изготовлен из молибдена, который обладает отличными парамагнитными свойствами. Однако природный молибден содержит в качестве примесей хром и железо, ослабляющее магнитное поле. Соответственно при большом количестве примесей свойства молибдена, как парамагнетика, становятся недостаточными.

Для проверки данного предположения было измерено магнитное поле магнетрона на различных высотах.

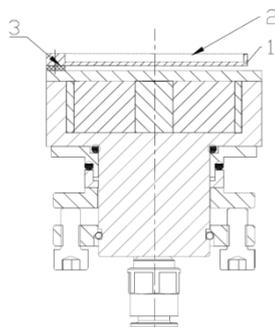


Рис. 1. Разрез жидкофазного магнетрона НМСА-50:

1 – тигель; 2 – мишень; 3 – диэлектрические прокладки

Измерения проводили миллитеслометром ГП2 – У2 – 03, первая серия измерений проводилась по диаметру, вторая по диаметру, находящемуся под углом 45° к первоначальному. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Измерение магнитного поля

Расстояние от центра, мм.	Значения магнитной индукции							
	Высота h=0 мм. Тигель, мишень, диэлектрические прокладки отсутствуют		Высота h=2 мм. Тигель, диэлектрические прокладки отсутствуют, мишень присутствует		Высота h=5,75 мм. Тигель, мишень присутствуют, диэлектрические прокладки отсутствуют		Высота h=7,75 мм. Тигель, мишень, диэлектрические пластинки присутствуют	
	$D_{\text{перв}}$, мТл	$D_{45^\circ}^0$, мТл	$D_{\text{перв}}$, мТл	$D_{45^\circ}^0$, мТл	$D_{\text{перв}}$, мТл	$D_{45^\circ}^0$, мТл	$D_{\text{перв}}$, мТл	$D_{45^\circ}^0$, мТл
0	10	11	10	10	10	10	10	12
5	115	140	55	70	60	58	30	40
10	125	120	95	90	75	70	55	53
15	100	85	70	75	60	38	50	45
20	60	40	40	50	40	38	35	28
25	20	2	10	20	20	10		
Состояние разряда	горит		горит		не горит		не горит	

Из измерений видно, что при появлении тигля магнитная индукция поля уменьшается. Так как тигель из парамагнетика, то он должен незначительно усиливать поле, а не ослаблять его. Для окончательного заключения о влиянии тигля на магнитное поле необходимо понять, как быстро меняется поле с высотой. Для этого были проведены измерения магнитного поля на высоте 3 мм (высота тигля 3,75 мм) без какого-либо материала между поверхностью магнетрона и миллитеслометром. После чего было измерено поле непосредственно на поверхности тигля, установленного в магнетроне без болтов и диэлектрических пластин. Данные измерения приведены в таблице 5.

Таблица 2. Измерение магнитного поля

Расстояние от центра магнетрона, мм	На высоте h=3 мм, мТл	Через тигель h=3.70 мм, мТл
0	7	8
5	36	51
10	61	70
15	46	53
20	32	32

Вывод: тигель не влияет на ослабление магнитного поля.

Анализ эффективности конфигурации магнитной системы

Цель: сравнить имеющуюся магнитную систему с альтернативной, выбрать наиболее эффективную, которая обеспечивала бы достаточное магнитное поле для исправной работы магнетрона. Имеющаяся и альтернативная системы изображены на рисунках 2 и 3.

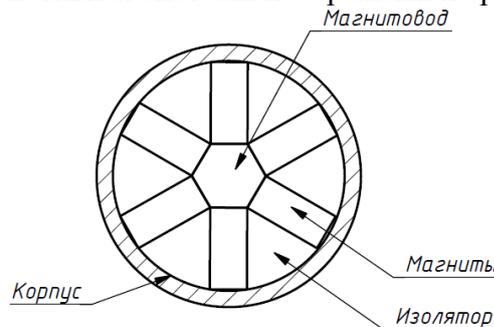


Рис. 2. Существующая магнитная система

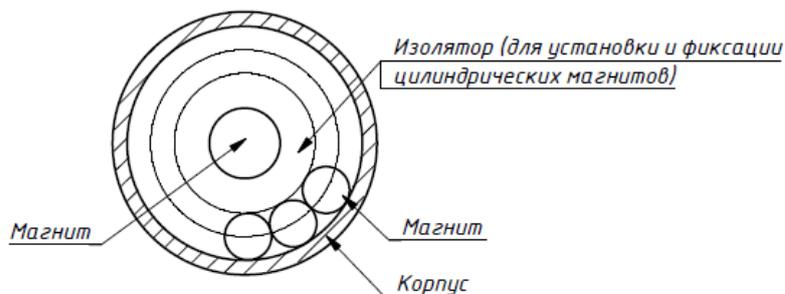


Рис. 3. Альтернативная магнитная система

С помощью программы FEMM была смоделирована существующая и альтернативная магнитные системы жидкофазного магнетрона. Модели магнитного поля изображены на рисунке 4.

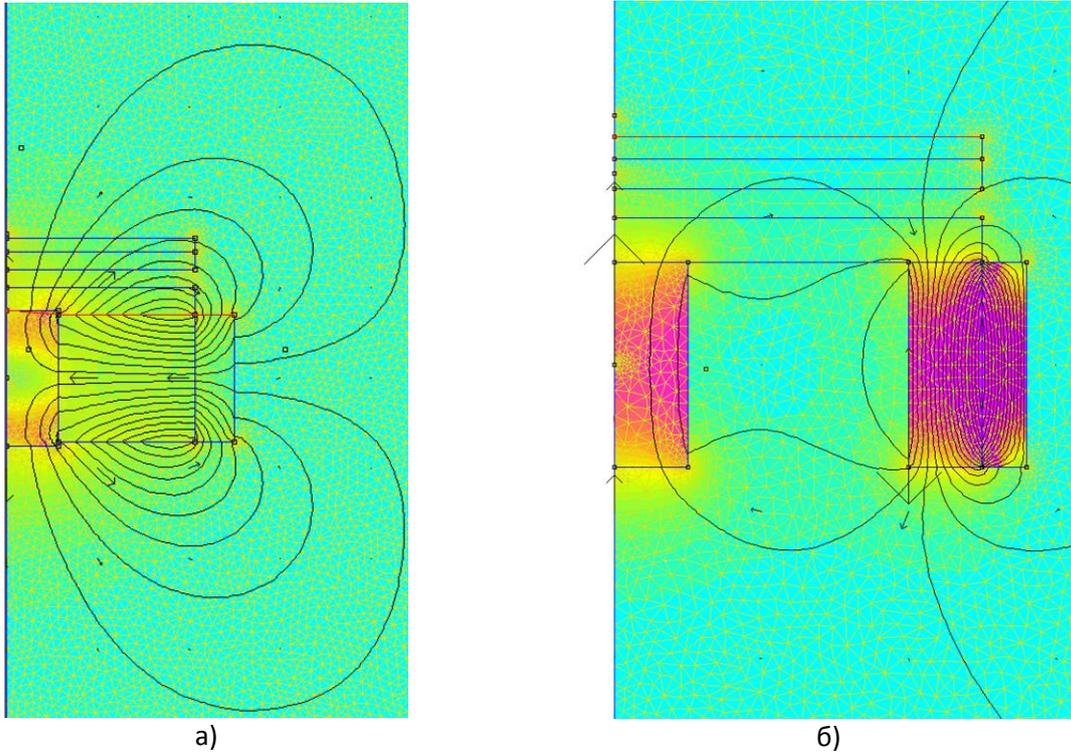
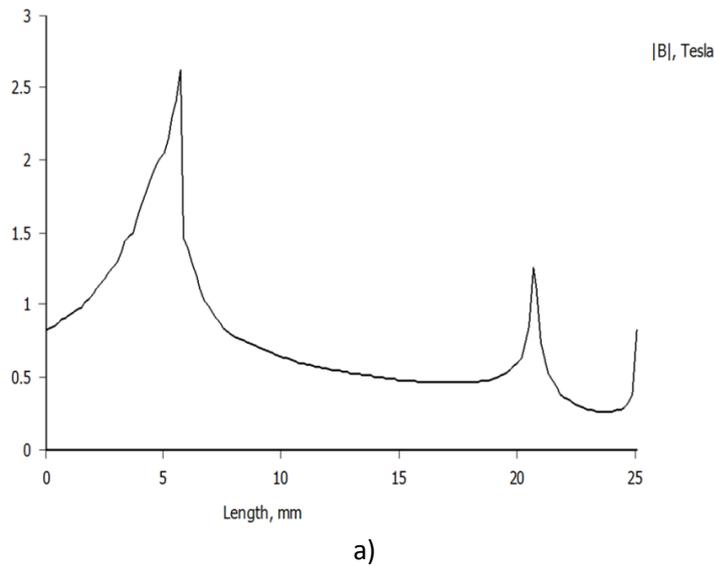
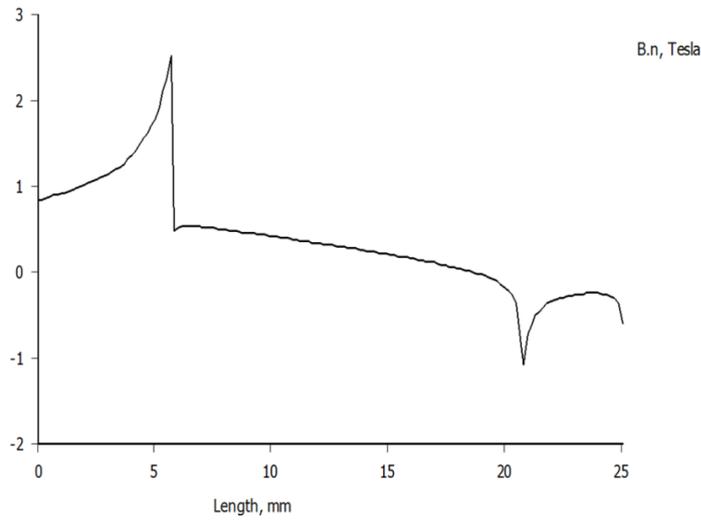


Рис. 4. Модель магнитного поля: а) имеющейся магнитной системы, б) альтернативной магнитной системы

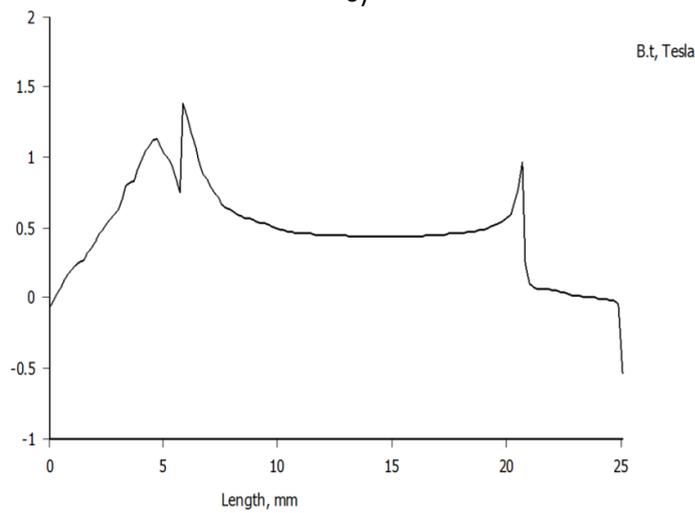
Графики значений магнитной индукции существующей на высоте $h=0$ мм изображены на рисунке 5, на высоте $h=6$ мм на рисунке 6, а графики альтернативной системы на рисунках 7 и 8.



а)

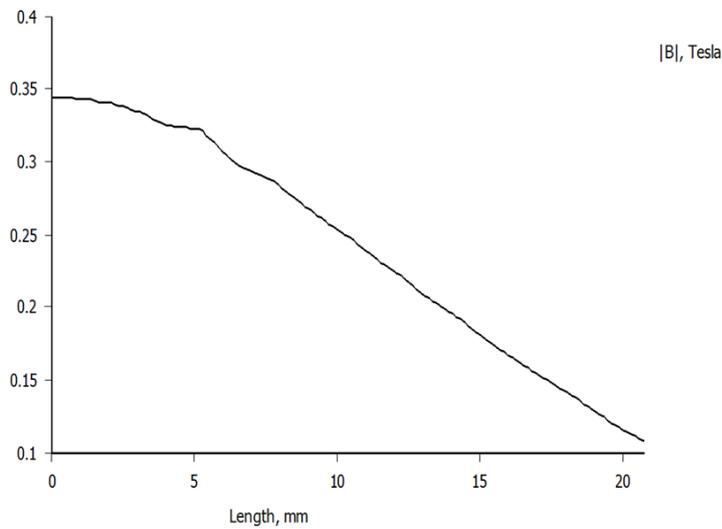


б)

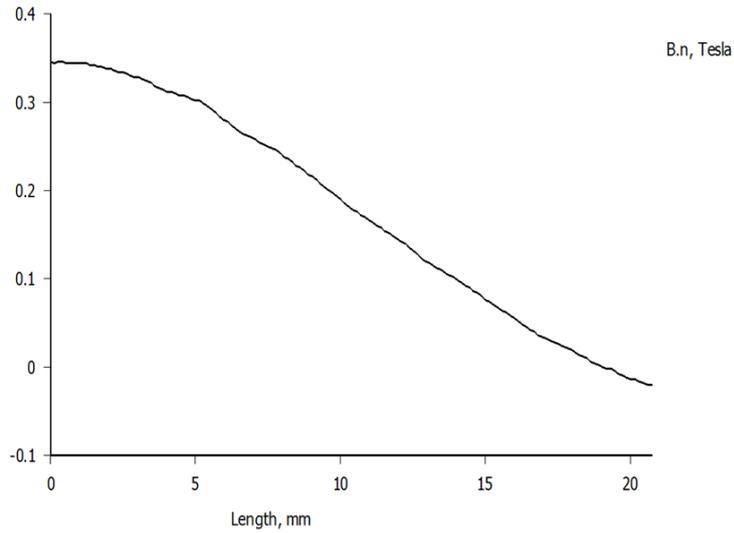


в)

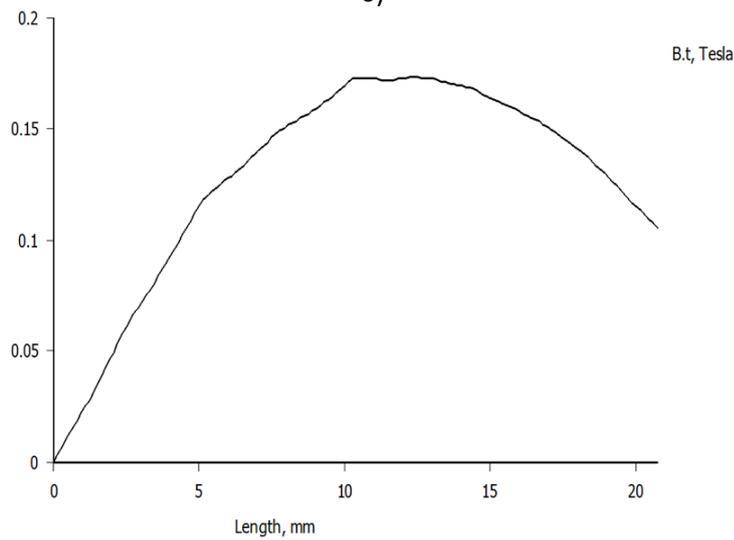
Рис. 5. Графики значений магнитной индукции на высоте $h=0\text{мм}$. а) модуль магнитной индукции, б) нормальная составляющая магнитной индукции, в) тангенциальная составляющая магнитной индукции



а)

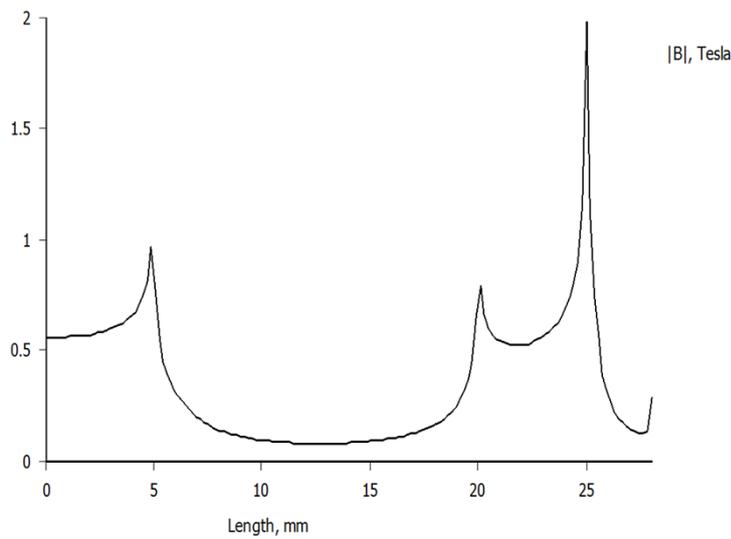


б)



в)

Рис. 6. Графики значений магнитной индукции на высоте $h=6$ мм. а) моль магнитной индукции, б) нормальная составляющая магнитной индукции, в) тангенциальная составляющая магнитной индукции



а)

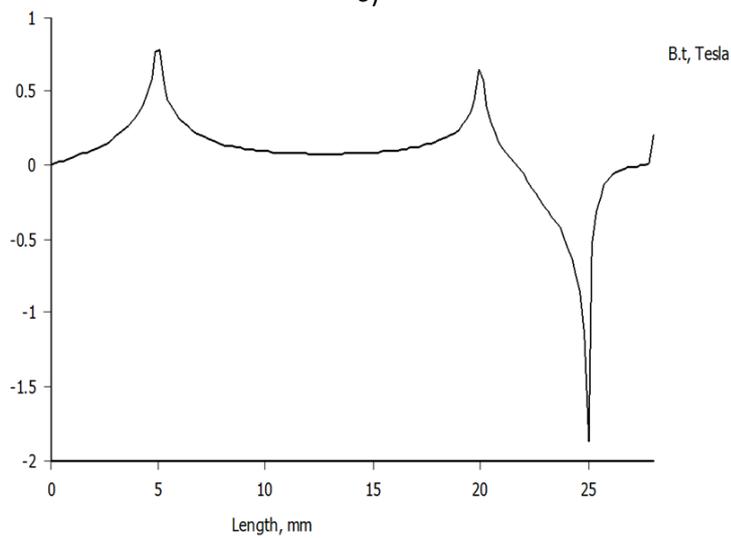
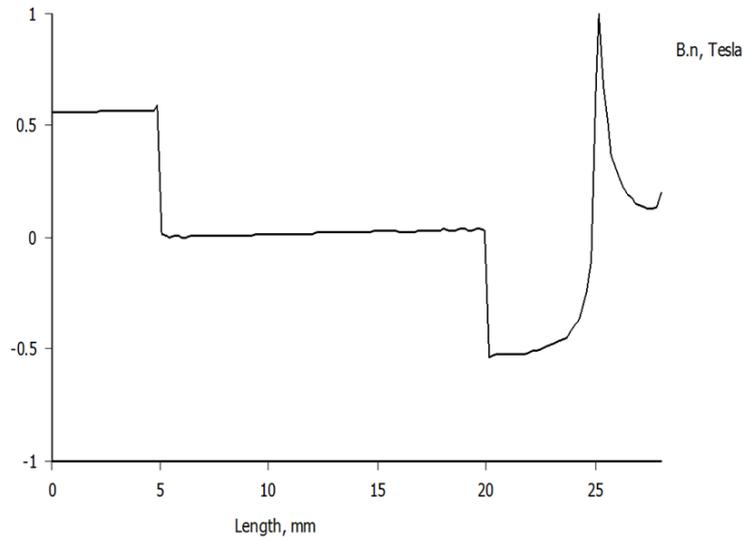
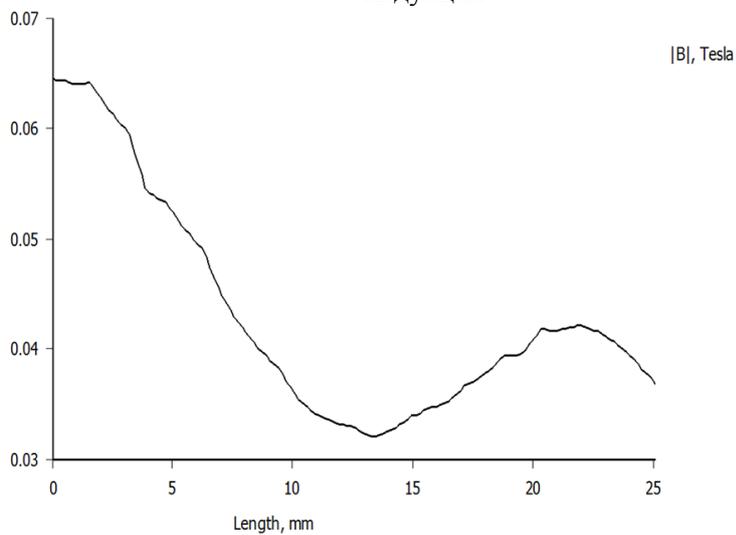


Рис.7. Графики значений магнитной индукции на высоте $h=0$ мм. а) модуль магнитной индукции, б) нормальная составляющая магнитной индукции, в) тангенциальная составляющая магнитной индукции



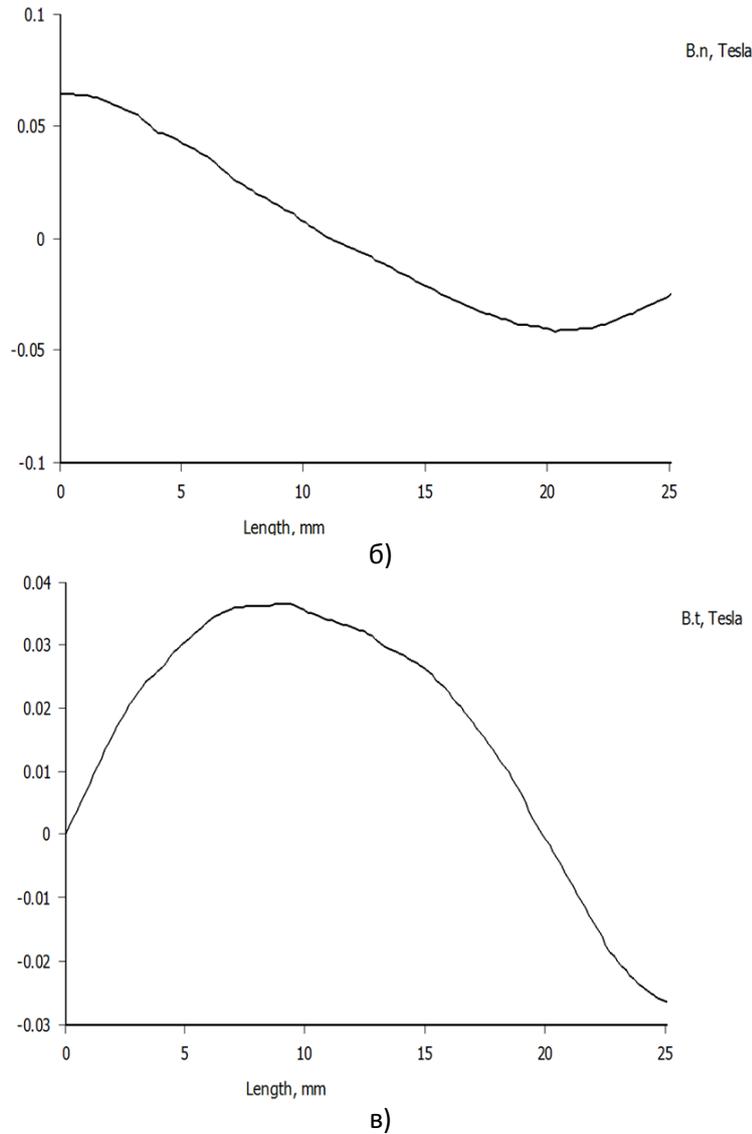


Рис.8. Графики значений магнитной индукции на высоте $h=6\text{мм}$. а) моль магнитной индукции, б) нормальная составляющая магнитной индукции, в) тангенциальная составляющая магнитной индукции
На рисунках 9 и 10 представлено графическое сравнение магнитных систем.

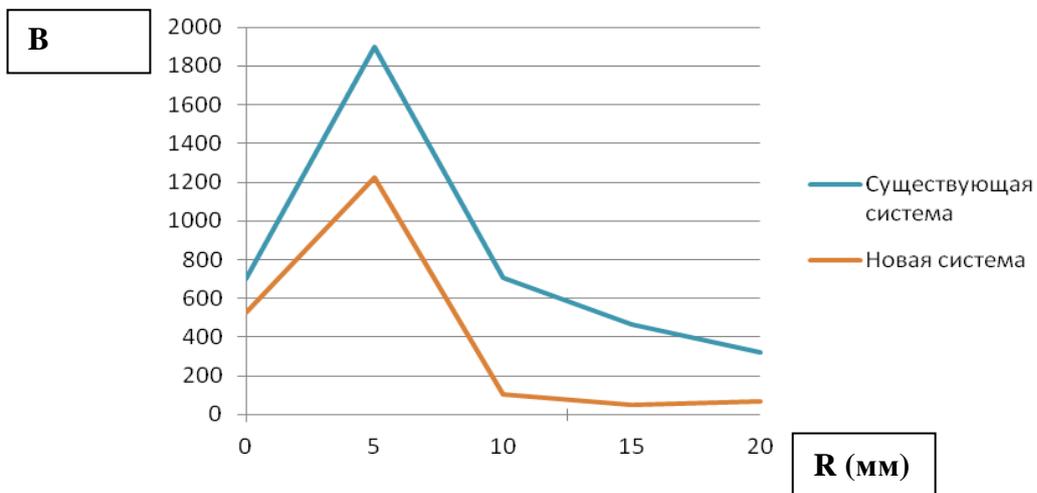


Рис.9. Графическое сравнение имеющейся и альтернативной системы на поверхности $h=0\text{мм}$

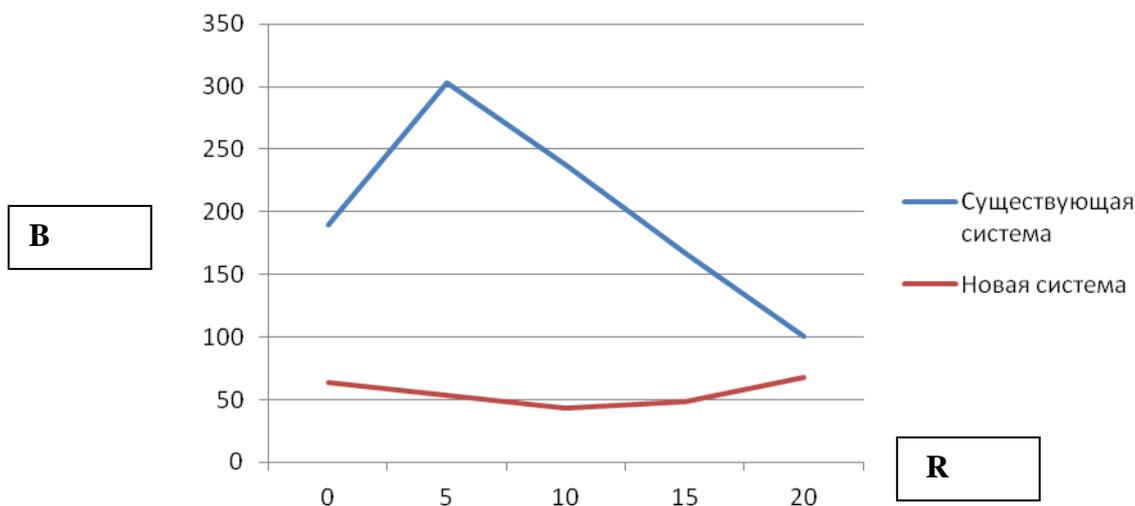


Рис.10. Графическое сравнение имеющейся и альтернативной системы $h=6\text{мм}$

Вывод: альтернативная система обеспечивает меньшую магнитную индукцию на необходимой высоте, чем имеющаяся, следовательно, замена системы не требуется.

Проверка магнитной силы постоянных магнитов

В таблице 7 приведено сравнение теоретических и практических значений имеющейся магнитной системы.

Таблица 7. Сравнение теоретических и практических значений имеющейся магнитной системы

На поверхности магнитов, $h=0\text{ мм}$					
R, мм	0	5	10	15	20
Теоретические значения, мТл	700	1900	706	463	323
Практические значения, мТл	11	140	120	85	20

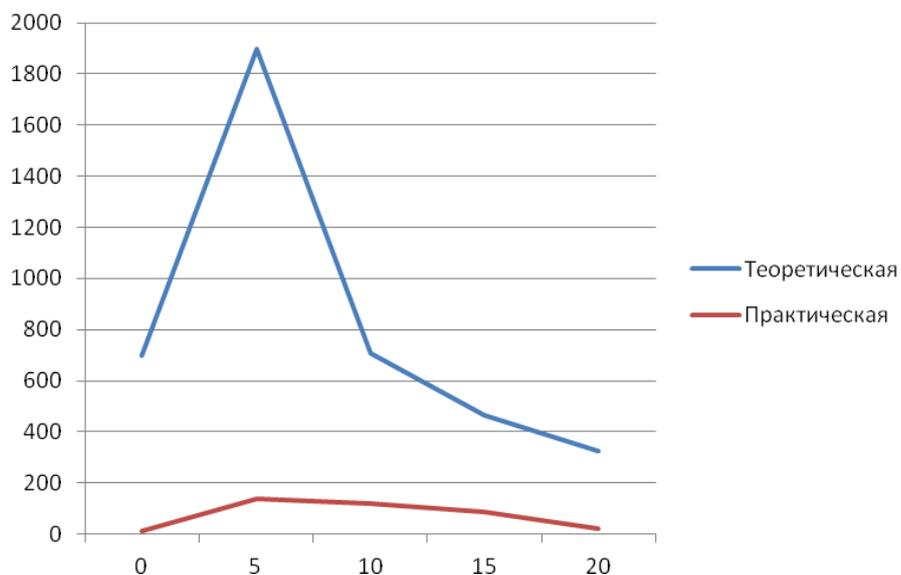


Рис.11. Графическое сравнение практической и теоретической системы

Вывод: теоретически возможная величина магнитной индукции данной системы сильно отличается от измеренной. Следовательно, недостаточная магнитная сила постоянных магнитов

является наиболее вероятной причиной некорректной работы жидкофазного магнетрона НМСА-50.

Выводы и результаты

Как видно из проведенных измерений: тигель не ослабляет магнитное поле магнетронной системы.

С помощью моделирования было установлено, что имеющаяся магнитная система обеспечивает большую магнитную индукцию, чем альтернативная.

Вследствие сильного различия теоретически возможной величины магнитной индукции и измеренной на практике можно предположить, что в имеющейся магнитной системе стоят слабые магниты. Следовательно, для обеспечения большего значения магнитной индукции необходимо заменить магниты в существующей системе.

Литература:

1. А. И. Кузьмичёв. Магнетронные распылительные системы /— М.: Из-во «Аверс», 2008;
2. http://eot-ttd.blog.tut.by/files/2014/08/Start_FEMM4_2_v2.pdf

УДК 621.79.024.6

ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ ПОДЛОЖЕК ПО КРИТЕРИЮ УГЛА

Юлия Сергеевна Макарова⁽¹⁾, Денис Дмитриевич Васильев⁽²⁾

Студент 4 курса⁽¹⁾, студент 6 курса⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.М. Моисеев

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

Необходимым условием получения изделий высокого качества и точности является четкое выполнение всех операций при его производстве. Относительно технологий микроэлектроники все требования принимают особо важный характер. Помимо необходимости поддержания чистоты помещения при производстве микроэлектронных устройств, также необходимо уделять немалое внимание к предварительной подготовке их оснований, т.е. подложек.

Чистота поверхности подложек играет огромную роль при изготовлении устройств микроэлектроники. Во время производственного процесса наличие на поверхности пластины разного рода загрязнений неизбежно, что препятствует получению высокой адгезионной прочности наносимого покрытия.

Возникающие выше перечисленные трудности, появляющиеся в связи с недостаточной степенью чистоты поверхности подложки, могут быть предотвращены различными методами предварительной подготовки подложек. Существует немало методов очистки полупроводниковых пластин, поэтому важной задачей является определить наиболее технологичный из них. Данная работа посвящена исследованию наиболее распространенных способов очистки подложек и выявлению наиболее эффективного из них.

Предварительная жидкостная очистка подложек

Как известно, покрытия на ситалле, в частности медь, имеют достаточно малую адгезионную прочность. Но ситалл с напыленным медным покрытием широко применяется для СВЧ приборов, поэтому важной задачей является обеспечить высокую адгезию меди к ситаллу. При решении этой задачи необходимо обращать внимание на множество факторов, в том числе и на чистоту поверхности.

Жидкостная очистка (далее ЖО) выполняется органическими растворителями; разнообразными составами, содержащими щелочи, кислоты, пероксид и другие реактивы, водой. Для равномерной очистки поверхность подложек (пластин) необходимо перевести в гидрофильное, то есть хорошо смачиваемое водой, состояние. Операция удаления жировых загрязнений, сопровождаемая переводом поверхности из гидрофобного в гидрофильное состояние, называется обезжириванием [1].

Обезжиривание (отмывка) в органических растворителях применяется для удаления с поверхности пластин (подложек) жиров животного и растительного происхождения, минеральных масел, смазок, воска, парафина и других органических и механических загрязнений [1].

Обработку пластин и подложек обычно ведут при УЗ-колебаниях, когда кавитация отсутствует и очистка интенсифицируется за счет вихревых акустических протоков жидкости. УЗ-колебания значительно повышают производительность и улучшают качество не только обезжиривания, но и других операций жидкостной обработки [1].

Ультразвуковая отмывочная ванна – оборудование, предназначенное для создания кавитации (т.е. процесс парообразования и последующей конденсации пузырьков воздуха в потоке жидкости, сопровождающийся шумом и гидравлическими ударами, образование в жидкости полостей, заполненных паром самой жидкости, в которой возникает) налитой в него жидкости. Устройство используется для ультразвуковой очистки твердых тел при помощи дезинфицирующих или моющих средств. Оборудование может применяться для катализации физических процессов или химических реакций в жидкостях - растворения, эмульгирования, экстракции, обеззараживания и др. [2].

Метод работы ультразвуковой мойки основывается на образовании в моющем растворе чередующихся волн высокого и низкого давления. Изделия, подвергающиеся обработке, полностью погружаются в жидкость. Размер очищаемой детали должен находиться в пределах 30-70% от объема емкости оборудования. Колебания при резонансной частоте создают кавитацию, образуя микроскопические пузырьки, которые разбиваются о поверхность очищаемого изделия. Данный процесс обеспечивает устранение загрязнений с мест, которые недоступны при применении других методов очистки [2].

Для контроля чистоты поверхности пластин используется гониометр. Прибор предназначен для измерения краевого угла смачивания методом лежащей капли. Прибор позволяет получать изображение лежащей на подложке капли с помощью цифровой видеокамеры, экспортировать изображение в компьютер, определять краевой угол смачивания методом касательной и на основе описания формы контура капли уравнением Лапласа. Прибор позволяет регистрировать отдельные изображения капель или серии изображений через равные промежутки времени [3].

Краевым углом (углом смачивания) обозначается угол, который образует капля жидкости на поверхности твердого вещества к данной поверхности. Размер краевого угла между жидкостью и твердым веществом зависит от взаимодействия между веществами на контактной поверхности. Чем незначительнее взаимодействие, тем больше значение краевого угла. Определив краевой угол можно узнать определенные свойства поверхности, как например, поверхностную энергию. Чем больше краевой угол, тем труднее смочить поверхность и тем меньше приставание чужеродных веществ к поверхности [4].

Необходимость обеспечения чистоты поверхности подложек возникает в связи с потребностью получения высокой адгезионной прочности покрытий. Одним из методов контроля адгезии пленки к подложке является скрайбирование, дающее качественную оценку адгезионной прочности. Результатом контроля покрытия скрайбированием является пленка, оставшаяся после снятия с нее клейкой ленты. Оставшиеся после скрайбирования сегменты пленки показывают качественную картину проведенного контроля.

Контроль производился с помощью оборудования, представленного на рисунке 1.

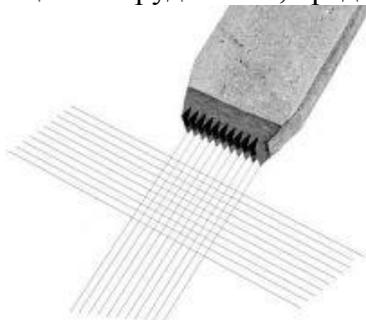


Рис.1. Адгезиметр Elcometer 107 (метод скрайбирования)

Описание экспериментов

Исходными образцами были ситалловые подложки, которые в процессе исследований обрабатывались различными способами и растворами.

Для достоверности полученных результатов необходимо было соблюдать неизменные исходные данные для каждого эксперимента, поэтому перед очисткой каждая подложка предварительно контролировалась и краевой угол смачивания каждой подложки составлял $72...75^{\circ}\text{C}$ (рис. 2). Контроль краевого угла смачивания проводился с помощью гониометра ЛК-1.

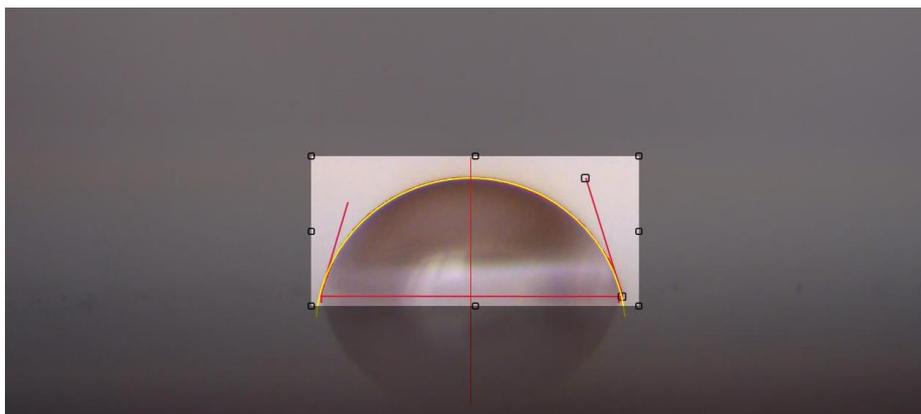


Рис. 2. Капля воды на поверхности неочищенной подложки

В процессе исследований использовался спирт, ацетон и концентрат А1 для выполнения предварительной очистки подложек.

Сами по себе растворы спирта и ацетона не представляют особо интереса для объяснения их функций и свойств. А1 представляет собой слабощелочной концентрат, который необходимо использовать при работе с ультразвуковой ванной (УЗВ). Рабочая температура раствора для очистки подложек находится в интервале $40 - 80^{\circ}\text{C}$, разводится водой в концентрации от 3% до 10%. В описании раствора указывается его узкая направленность функций, а именно для очистки керамических подложек и пластин для оптических приборов.

Для выполнения качественной очистки подложек и дальнейшего применения способа данной очистки в производстве необходимо использование УЗВ. Подложки чистились с помощью УЗВ «Водолей» (рис. 3, таб. 1).



Рис. 3. УЗВ «Водолей»

Таблица 2. Технические характеристики УЗВ «Водолей»

Характеристика	Значение
Объем УЗВ, л	1,3
Частота, кГц	35
Потребляемая мощность, Вт	205
Регулировка нагрева, °С	20...70
Регулировка времени, мин	0...99

Целью экспериментов является исследование режимов предварительной очистки подложек и их влияние на чистоту поверхности и оценка зависимости адгезии от значения краевого угла смачивания подложки.

В первом этапе экспериментов определялся раствор, который при очистке в нем подложки обеспечивает наименьший краевой угол смачивания. Эксперимент проводился при промежуточных режимах, т.е. при температуре 50°С и времени очистки 5 мин в УЗВ и состоял в следующем: наливалось определенное количество исследуемого раствора, и помещалась подложка и эта емкость опускалась в УЗВ, наполненную предварительно водой. После очистки каждая подложка сушилась производственным феном. В отношении раствора А1 использовалась его фиксированная концентрация, равная 10%. Также, учитывая свойства раствора, его необходимо смыть, что осуществлялось путем промывки подложки проточной водой и спиртом (таб. 2).

Таблица 3. План экспериментов первого этапа

	Спирт	Ацетон	А1
№ эксп	1	2	3

Во втором этапе экспериментов определялись зависимости краевого угла смачивания от температуры и времени обработки. Ход экспериментов проходил аналогично этапу 1, но уже только с наиболее эффективным раствором, выявленном в предыдущем этапе экспериментов (таб. 3).

Таблица 4. План экспериментов второго этапа

°С/мин	1	3	5	7	9
40			№6		
50	№7		№4		№8
60			№5		

Так как целью очистки является получение высокой адгезионной прочности покрытий, были проведены эксперименты по нанесению медного покрытия на очищенные подложки.

Пленки меди получались методом магнетронного распыления медной мишени на установке ВУП-11М (рис. 4) при помощи импульсного униполярного источника АРЕL-М-3РDС в лаборатории кафедры «Электронные технологии в машиностроении». Все покрытия формировались при одних параметрах процесса (таб. 4).



Рис. 4. Установка ВУП-11М

Таблица 5. Режимы нанесения медного покрытия

Параметр	Значение
Остаточное давление, Па	$5,5 \cdot 10^{-3}$
Рабочее давление, Па	0,2
Рабочий газ	Ag
Поток газа, л/ч	0,52
Ток, А	0,3
Режим нанесения	импульсный
Частота, кГц	50
Коэффициент заполнения импульса, %	20
Время, мин	5
Материал мишени	Cu
Диаметр мишени, мм	100

Контроль чистоты поверхности подложки проводился с помощью определения краевого угла смачивания.

В качестве прибора для контроля краевого угла смачивания использовался гониометр ЛК-1 (рис. 5).



а)

б)

Рис. 5. Гониометр ЛК-1: а) общий вид; б) схема прибора

Исследуемая подложка помещается на специальный горизонтальный столик, который закреплен на препаратодателе. Капля дистиллированной воды помещается на подложку посредством микрошприца. Препаратодатель позволяет перемещать подложку в

горизонтальной и вертикальной плоскости так, чтобы изображение капли на подложке располагалось по центру в поле зрения. Фокусировка производится горизонтальной подачей в режиме непрерывной передачи изображения капли на экран ПК при помощи видеоокуляра. Использовался объектив с 4х увеличением. Подсветка капли оптимизируется вращением зеркала.

Для получения наиболее достоверных результатов каждая подложка измерялась в трех точках, и бралось среднее значение угла. Также до очистки каждая неочищенная подложка контролировалась для соблюдения неизменности исходных данных.

Нанесенное медное покрытие проверялось на адгезию методом скрайбирования и оценивалась по шкале ISO. Данная шкала представляет собой пятибалльную систему оценки адгезии, где 5 – наихудшая, 0 – наилучшая.

Результаты экспериментов

В результате первого этапа экспериментов получено, что при очистке подложки разными растворами получается разный краевой угол смачивания поверхности (таб. 5).

Таблица 6. Результаты экспериментов по первому этапу

№ эксп.	Растворы	Значение краевого угла смачивания, °С
1	Спирт	53,957
2	Ацетон	54,512
3	A1	28,719

По итогам первой серии экспериментов было выявлено, что наиболее эффективным раствором для предварительной очистки является A1, поэтому дальнейшие исследования проводились на его базе.

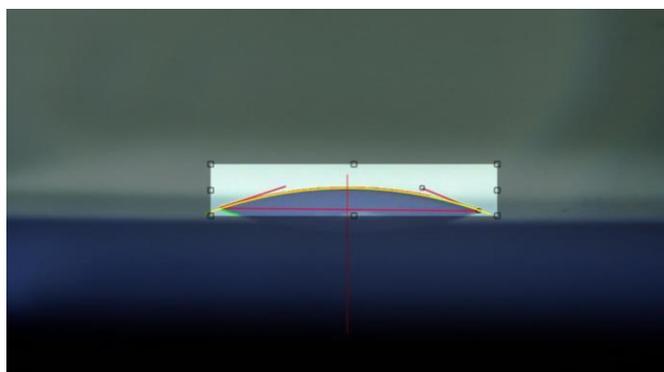
По результатам второго этапа экспериментов необходимо было выявить зависимости между краевым углом смачивания и температурой и временем очистки подложки в УЗВ (таб. 6).

Таблица 7. Результаты экспериментов по второму этапу

№ эксп.	Температура очистки, °С	Время очистки, мин	Значение краевого угла смачивания	Адгезия
4	50	5	18,724	5
5	60	5	16,740	4
6	40	5	20,567	5
7	50	1	18,858	5
8	50	9	17,750	5



а)



б)

Рис.6. Результаты контрольных операций: а) измерение адгезии; б) измерение краевого угла смачивания

Анализ полученного набора результатов экспериментов показал, что на значение краевого угла смачивания сильно влияет температура очистки и слабо – время. Также с

помощью предварительной очистки подложек в УЗВ достичь высокой адгезионной прочности покрытия не удалось. На рисунке 6 показаны результаты контрольных операций измерения адгезии и угла.

Выводы

Проведенные эксперименты по выбору раствора и отработке режимов предварительной очистки подложек показали, что наиболее эффективным является очистка раствором при температуре 60°C, времени очистки – 5 мин. Анализ результатов экспериментов показал, что интенсивность очистки явно зависит от температуры и слабо зависит от времени.

По результатам исследований высокой адгезионной прочности покрытия достигнуто не было. Это говорит о недостаточности только предварительной очистки и ставит необходимость в поиске дополнительных способов получения высокого значения адгезии. В дальнейшем планируется отработать предварительную очистку подложек, используя другие методы, такие как обработка пластины источником ионов и ее нагрев.

Литература

1. Шмаков М., Паршин В., Смирнов А. Школа производства ГПИС. Очистка поверхности пластин и подложек/Шмаков М.//Технологии в электронной промышленности – 2008. - №5. – С.77-78.
2. http://www.protehnology.ru/page/ultrazvukovye_vanny
3. Гониометр ЛК-1. Инструкция по эксплуатации.
4. <http://www.briteguard.com/109.html?L=8>

УДК 539218621.793

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ БЕЗДЕФЕКТНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИКЕЛЯ НА СТЕКЛЕ

Елизавета Ильинична Малеванная⁽¹⁾, Денис Дмитриевич Васильев⁽²⁾

Студент 3 курса⁽¹⁾, студент 6 курса⁽²⁾

кафедра "Электронные технологии в машиностроении"

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.М. Моисеев

кандидат технических наук, доцент кафедры "Электронные технологии в машиностроении"

К материалам электронной и радиоэлектронной промышленности предъявляются высокие требования по качеству: в пленках не должно быть примесей и пор. Например, при изготовлении тонкопленочных конденсаторов поры в пленке диэлектрика приводят к пробое и являются причиной негодности этого элемента микросхемы [1]. Пористая структура, в том числе и на поверхности, тонкопленочных проводящих элементов схемы, вызывает потери электрической энергии, что приводит к уменьшению эффективности разработанной микросхемы [2]. Таким образом, поры в пленках, являясь негативным фактором, влияющим на долговечность и корректность работы электронных систем, требуют по возможности полного своего устранения.

Пористая структура покрытий объясняется спецификой формирования тонких пленок на поверхности подложки. При осаждении на поверхность подложки формируется столбчатая структура пленки, из-за чего в пленке образуются проколы [3].

На морфологию и рост пленок оказывает влияние ряд факторов:

- морфология поверхности подложки;

- скорость осаждения материала пленки;
- температура подложки;
- энергия осаждающихся частиц.

Для уменьшения влияния вышеперечисленных факторов предлагается несколько способов [3] (табл. 1).

Целью этой работы является получения бездефектного функционального тонкопленочного покрытия толщиной $0,6 \pm 0,2$ мкм из никеля для электродов на стекле для дальнейшего проведения процессов литографии.

Эксперименты проводились на установке ВУП-11М кафедры МТ11 «Электронные технологии в машиностроении». ВУП-11М [4] относится к установкам вакуумного нанесения периодического действия, и предназначена для нанесения широкого спектра покрытий.

Для получения тонкопленочного покрытия из никеля использовался метод магнетронного распыления. Чтобы минимизировать влияние никеля на магнитное поле магнетрона, мишень была изготовлена из тонкой никелевой платины толщиной 0,5 мм.

Был проведен эксперимент по нанесению тонкой пленки никеля на стекло с целью проверить работоспособность магнетрона с тонкой никелевой мишенью и определить скорость осаждения материала. Параметры процесса занесены в таблицу 2.

Таблица 1. Способы уменьшения пористости

№ п/п	Мера по уменьшению пористости	Влияние
1	Предварительная ионная очистка подложек и ионное полирование	Позволяет получить чистую поверхность с низкой шероховатостью, т. е. уменьшает влияние морфологии подложки на структуру пленки и увеличивает адгезию покрытия
2	Нагрев подложки	Более высокая температура обеспечивает более длительный переход атома из возбужденного состояния в состояние с минимальной энергией и более интенсивное перемещение атомов по подложке, что приводит к большему количеству центров зародышеобразования [2]
3	Уменьшение скорости осаждения	Низкая скорость дает больше времени на миграцию атомов по поверхности подложки до осаждения следующих атомов. Это, также, влечет за собой увеличение количества центров образования зародышей пленки
4	Увеличение энергии осаждающихся атомов	Более высокая энергия обеспечивает более долгий переход к минимуму энергий для атомов, из-за этого происходит увеличение количества

		центров роста пленки
5	Ионное ассистирование при нанесении	Вследствие сообщения дополнительной энергии ионами осаждающихся частиц формируется более мелкозернистая и плотная структура пленки

Таблица 2. Параметры эксперимента по нанесению никеля на стекло

№	Параметр	Значение
1	Расстояние, мм	100
2	Р ост, мбар	$5,6 \cdot 10^{-5}$
3	Р, мбар	$2,6 \cdot 10^{-3}$
4	Тип источника	DC
5	Q _{AR} , л/ч	0,52
6	I, А	0,43
7	U, В	533
8	Р, Вт	230
9	t, мин	7

В полученной пленке на просвет были видны четкие проколы. При царапании пленка легко отходила от подложки. Толщина пленки при измерении на СЗМ SolverNext составила 470 нм. Для улучшения качества покрытия и уменьшения количества пор в пленке было решено нанести покрытие при меньшем значении мощности и при увеличенном расстоянии до магнетрона (табл. 3).

Таблица 3. Параметры процесса нанесения никеля при меньшей мощности

№	Параметр	Значение
1	Расстояние, мм	120
2	Р ост, мбар	$5,6 \cdot 10^{-5}$
3	Р, мбар	$2,6 \cdot 10^{-3}$
4	Тип источника	DC
5	Q _{AR} , л/ч	0,52
6	I, А	0,36
7	U, В	392
8	Р, Вт	140
9	t, мин	7

Пленка, полученная после второго эксперимента, оказалась более высокого качества: на просвет пор не было видно. Поверхность пленки была рассмотрена на микротвердомере ПМТ-3М. На этом устройстве установлена цифровая камера-окуляр, которая позволяет смотреть покрытия на компьютере и производить линейные измерения. При увеличении были видны редкие поры (рис. 1). Была сделана царапина, чтобы посмотреть, как ведет себя пленка на стекле (рис. 2). Пленка довольно легко отходила от поверхности.

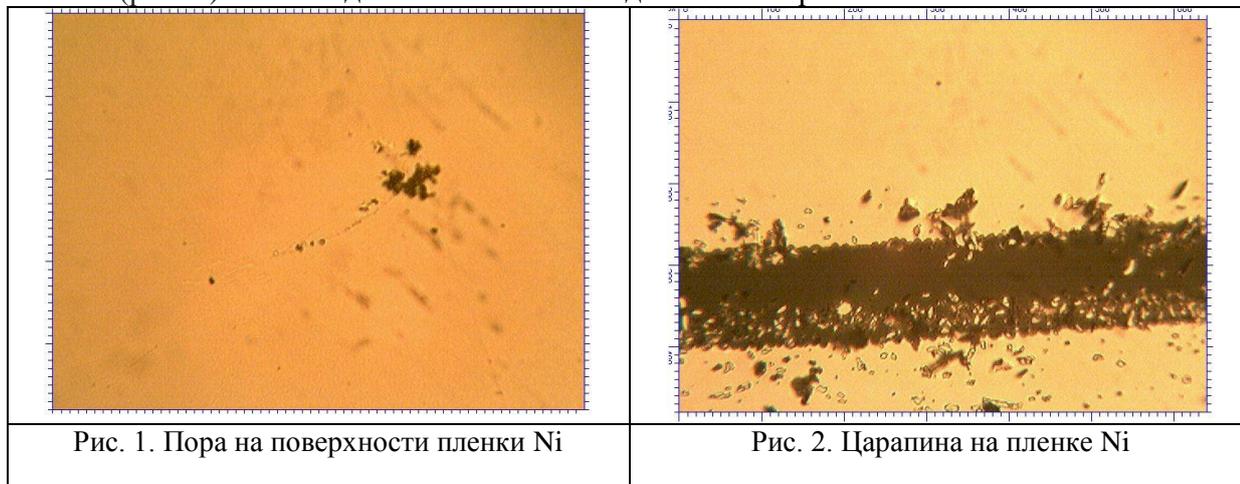


Рис. 1. Пора на поверхности пленки Ni

Рис. 2. Царапина на пленке Ni

Был сделан третий образец пленки никеля на стекле. Поверхность стекла была отполирована после предыдущей пленки. Расстояние и мощность были уменьшены. Уменьшение расстояния увеличило скорость осаждения материала, однако влияние расстояния на скорость меньше, чем влияние мощности. Параметры процесса нанесения представлены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры процесса нанесения никеля при меньшем значении мощности

№	Параметр	Значение
1	Расстояние, мм	90
2	Р ост, мбар	$3,3 \cdot 10^{-5}$
3	Р, мбар	$2,6 \cdot 10^{-3}$
4	Тип источника	DC
5	Q_{AR} , л/ч	0,52
6	I, А	0,25
7	U, В	370
8	Р, Вт	90
9	t, мин	7

Полученное покрытие было рассмотрено на микротвердомере. При увеличении были видны следы полировки. В пленке были обнаружены поры (рис. 3), а также некоторые включения округлой формы (рис. 4). Возможно, данный дефект образовался из-за неплотного

прилегания мишени к магнетрону, в результате чего мишень сильно нагревалась, и на подложку осаждались целые кластеры материала.



Рисунок 3. Пора в пленке Ni



Рисунок 4. Дефект в пленке

Был проведен очередной эксперимент по нанесению никелевого покрытия. Для проведения процесса был выбран ВЧ источник. Поверхность стекла была отполирована от прошлой пленки и почищена спиртом. Параметры эксперимента указаны в таблице 5.

Образец покрытия был рассмотрен при увеличении. На поверхности были заметны следы полировки, проколов в пленке очень мало (рис. 5). Также, видны небольшие включения материала в пленке и разводы, возможно, появившиеся при обработке спиртом.

Таблица 5. Параметры процесса нанесения никеля ВЧ источником

№	Параметр	Значение
1	Расстояние, мм	90
2	Р ост, мбар	$2,6 \cdot 10^{-5}$
3	Р, мбар	$2,6 \cdot 10^{-3}$
4	Тип источника	RF
5	Q _{AR} , л/ч	0,72
6	Р, Вт	200
7	t, мин	8

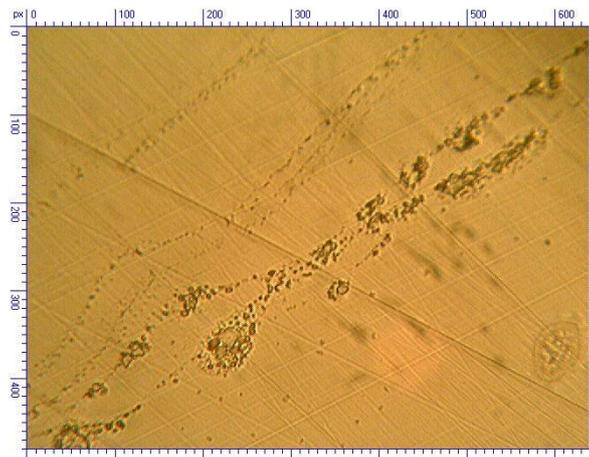


Рисунок 5. Поверхность пленки Ni

Из проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что уменьшение скорости осаждения покрытия приводит к уменьшению количества пор в пленке.

В дальнейшем планируется провести эксперименты по формированию тонкопленочной структуры с подачей тока смещения на подложку, чтобы оценить влияние энергии осаждающихся частиц на пористость покрытия.

Литература

1. Чебурахин И.Н., Нефедьев Д.И., Оценка качества тонкопленочных тензоструктур МДМ/ Д.И. Чебурахин// Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. - 2013. - №3. - С. 54-60.
2. Технология тонких пленок. Справочник / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга: Пер. с англ; Под ред. М.И. Элинсона, Г.Г. Смолко. М.: Советское радио. 1977. Т.1. 664 с.
3. И.Ф. Ивановский, В.И. Петров Ионно-плазменная обработка материалов. - М.: Радио и связь. 1986. - 232 с.
4. Д.Д. Васильев, Е.И. Малеванная// Формирование двухкомпонентных тонких пленок на установке ВУП11-М/ Будущее машиностроения России: сб. тр. Седьмой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Москва, 24-27 сентября 2014 г./ Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – С. 154-155.

УДК 543.271, 533.5.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Мария Сергеевна Мосина

Студент 5 курса

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.М. Базиненков

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Аннотация

В настоящее время создано огромное количество устройств перемещения. Однако каждый механизм имеет свои достоинства и недостатки, и поэтому перед инженерами каждый раз стоит проблема выбора того или иного наиболее подходящего привода. Просматривается

некоторая зависимость: точнее привод, тем меньше нагрузочная способность. Появившиеся гидравлические привода на основе магнитореологической жидкости позволили объединить в себе и то, и другое.

В данной работе представлено исследование точности трехкоординатного магнитореологического привода на основе гидростатической опоры. Проведен анализ формулы для определения общей погрешности привода. Представлены результаты экспериментов по изучению тока трогания МРЖ и деформации вакуумного сильфона на поперечный изгиб.

Введение

В связи с тенденцией современной технической области к уменьшению размеров компонентов, повышаются требования к используемому технологическому оборудованию, необходимого для перемещения и позиционирования элементов с повышенной точностью. К таким областям относятся, к примеру, микролитография, электронная микроскопия и др.

Для определения точности механизма используется формула общей погрешности привода, которая складывается из нескольких составляющих. Для повышения точности перемещения необходимо устранить влияния максимально большего количества слагаемых на исходную величину.

Механизмы перемещений

Существуют различные классификации механизмов перемещений. По принципу преобразования разных видов энергии в кинетическую энергию перемещения рабочего тела, приводы можно разделить на несколько основных групп [1]:

1. Тепловой механизм – преобразует тепловую энергию в кинетическую.

Перемещение осуществляется за счет изменения размеров материала, которое происходит при изменении температуры. Термомеханические системы используют физическое расширение или сжатие, которое происходит в материалах, когда изменяется их температура в их первоначальной фазе (изменения агрегатного состояния не происходит).

Достоинства: компактный размер, рабочий ход, система управления, точность

Недостатки: необходимость нагрузки, быстродействие

2. Электрический механизм - преобразует энергию электромагнитного поля в кинетическую энергию исполнительного механизма.

К данному типу относится пьезоэлектрический механизм. Перемещения возникают из-за размерных изменений, возникающих в отдельных кристаллических материалах (пьезоэлектриках) при воздействии электрического поля или электрического заряда. Этот эффект носит название обратного пьезоэлектрического. Типичный пьезоэлектрический материал - кварц (SiO_2).

Достоинства: компактный размер, точность

Недостатки: низкая нагрузочная способность, рабочий ход

Таблица 1. Анализ характеристик приводов

Характеристики	Тип механизма			
	Тепловый [2]	Пьезо [3]	Гидро [4]	Пневмо
Рабочие температуры, °С	1,1...148,9	20...+50	20... +80	0...+60
Рабочий ход, мм	22,6...63,5	50	500	2000
Максимальная нагрузка, кг	До 100	До 10	До 100	До 1000
Погрешность, нм	До 10	0,0-5-10	0-100	0-1000

3. Гидравлический механизм – совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством гидравлической энергии, энергии сжатой жидкости (в подавляющем большинстве механизмов, масла).

Достоинства: рабочий ход, нагрузочная способность

Недостатки: точность, громоздкость, необходимость гидравлической системы

4. Пневматический механизм – совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством энергии сжатого газа. Обязательным элементом пневматического привода являются компрессор (генератор пневматической энергии) и пневмодвигатель.

Достоинства: простота конструкции, дешевизна, рабочий ход

Недостатки: точность, необходимость пневмосистемы.

Гидравлические механизмы с магнито реологическим управлением

В настоящее время очень перспективными материалами являются материалы с управляемыми реологическими свойствами. Реология – наука о течении и свойствах вязких сред, проявляющих одновременно несколько фундаментальных свойств, вязкость, упругость, пластичность, прочность и т.д., в условиях воздействия на них сдвиговых, магнитных, электрических, тепловых, гравитационных и других полей [5]. К таким материалам относятся магнито реологические и электро реологические жидкости и эластомеры, а также ферро жидкости.

Магнито реологические (МР) жидкости представляют собой суспензии магнитных частиц (восстановленное железо, чистое железо, кобальт, карбонильное железо, никель) размером порядка 1...20 мкм в жидкости-носителе. Носителем могут выступать различные жидкости, в зависимости от назначения устройства это могут быть: вода, кремнийорганическая (силиконовая) жидкость, синтетические и полусинтетические масла, минеральные масла и т.д. Под действием магнитного поля частицы, распределенные в объеме дисперсионной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля (МР-эффект) (рис. 4). При этом магнитное взаимодействие между частицами приводит к значительному изменению реологических свойств, поскольку образованные структуры препятствуют свободному перемещению суспензии и вызывают увеличение вязкости жидкости более чем в 100000 раз, что зависит от материала частиц дисперсной фазы, дисперсионной среды, размеров частиц и их объемной концентрации, а также других параметров. Благодаря этому эффекту МР жидкости получили широкое распространение в полуактивных демпфирующих устройствах, тормозных системах и жидкостных захватах.



Рис. 4. МР-эффект: а – в присутствии магнитного поля H , б – без внешнего поля

Магнито реологический дроссель (МРД) предназначен для регулирования потока жидкости и выполняет роль клапана. Конструкция позволяет уменьшить потери давления из-за отсутствия движущихся и трущихся инерционных частей как в других типах клапанов. Схема МРД показана на рис. 5.

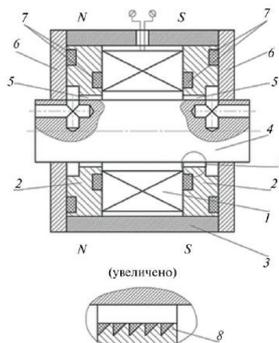


Рис. 5. Схема МРД

1 — электромагнитная катушка; 2 — кольца; 3 — втулка; 4 — сердечник; 5 — рабочий зазор; 6 — фиксирующие кольца; 7 — уплотнительные кольца; 8 — концентраторы напряженности магнитного поля

Данный элемент позволяет использовать очень полезное свойство магнитореологической жидкости - магнитореологический эффект, принцип действия которого представлен на рис. 6. При протекании МР жидкости через рабочий зазор дросселя, показанный на рис. 5, в отсутствии магнитного поля жидкость свободно протекает, но как только на катушку подается напряжение, магнитные частички начинают выстраиваться вдоль силовых линий поля, образуя твердую структуру на вершинах зуба, где концентрация магнитного поля наибольшая. Образовавшаяся твердая структура мешает протеканию жидкости. При достижении некоторого значения B_{max} жидкость не протекает совсем. Дроссель закрыт. Изменяя величину управляющего сигнала, подаваемого на МР дроссели, можно регулировать давление рабочей среды в камерах высокого давления и перемещать каретку по трем координатам X,Y,Z. Линейные перемещения каретки по осям X и Y преобразуются в угловые смещения сегмента вокруг упругого шарнира.

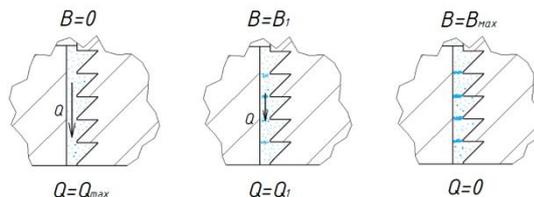
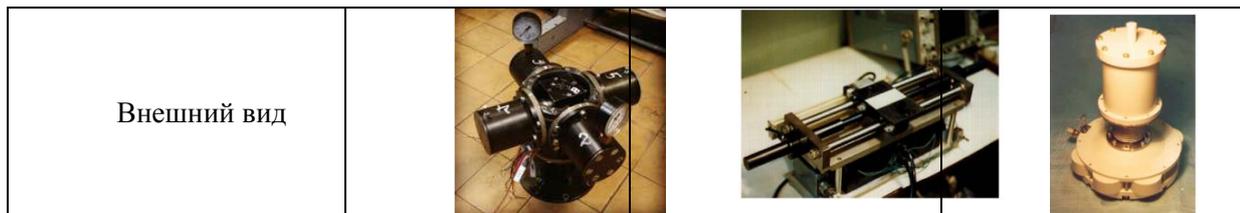


Рис. 6. Принцип действия МР дросселя

В МГТУ имени Н.Э. Баумана на кафедре МТ-11 разрабатываются механизмы точных перемещений и активной виброизоляции на основе указанных материалов

Таблица 2. Сравнение магнитореологических приводов

Технические характеристики	МР привод с сильфонной герметизацией	Однокоординатный привод	МР привод на основе гидростатической опоры
Рабочий ход, мм	10	200	2
Погрешность перемещения, нм	100	1000	50
Постоянная времени, мс	<200	<200	<200
Развиваемое усилие, Н	>1000	>1000	>1000



В данной работе рассматривается МР привод на основе гидростатической опоры, имеющий самую низкую погрешность перемещения. Привод предполагалось использовать для позиционирования элементарного зеркала составного главного зеркала адаптивного составного телескопа АСТ-25.

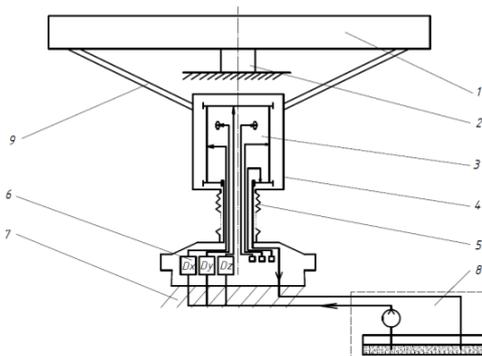


Рис. 7. Схема установки с МР приводом

С помощью системы подачи жидкости 8, суспензия под давлением поступает в привод, протекая через магнитореологические дроссели 6, распределяющие жидкость по шести каналам, соответствующим направлению осей координат. Создавая разность давления в попарно расположенных рабочих полостях, подвижная часть привода 4, упруго соединенная с неподвижным корпусом 3, установленном на основании 7, через сильфон 5 с помощью тяг 9 перемещает зеркало 1, установленное на узле упругой подвески 2. Тем самым, линейные перемещения привода преобразуются в поворотное движение зеркала вокруг оси узла подвески, которая полностью держит нагрузку, позволяя приводу совершать очень точные перемещения с маленькой погрешностью.

Погрешность позиционирования механизма

В магнитореологическом приводе используется замкнутая система: контролируется непосредственно перемещение объекта, а сигнал обратной связи корректирует работу двигателя.

Для замкнутых систем управления приводом, наиболее часто применяемых в прецизионном технологическом и исследовательском оборудовании, погрешность перемещения может быть записана в общем виде [6]:

$$\delta_{\text{р}} = \delta_{\text{н}} + \delta_{\text{л}} + \delta_{\text{с}} + \delta_{\text{и}} \quad (1)$$

где $\delta_{\text{в}}$ – ошибка, обусловленная воспроизведением задающего воздействия системы управления; $\delta_{\text{н}}$ – ошибка, возникающая вследствие воздействия возмущающих сил или начальных условий; $\delta_{\text{к}}$ – ошибка, связанная с кинематическими погрешностями привода; $\delta_{\text{л}}$ – ошибка, обусловленная люфтом; $\delta_{\text{с}}$ – ошибка, обусловленная наличием нагрузок и сил статического сопротивления в приводе; $\delta_{\text{и}}$ – инструментальная ошибка.

Применение систем стабилизации температуры и вибрационной защиты позволяет почти полностью исключить погрешность $\delta_{\text{н}}$, связанную с возмущающими силами и начальными условиями.

Использование современных прецизионных систем измерения положения, в частности лазерных интерферометров, дает возможность значительно уменьшить и сделать практически незначимой погрешность δ_n ($\delta_n < 10^{-2}$ мкм).

В этом случае основной доминирующей погрешностью, определяющей точность следящего привода с замкнутой системой управления, остается погрешность δ_c , обусловленная наличием нагрузок и сил статического сопротивления в приводе:

$$\delta_{\varphi_p} = \delta_c \quad (2)$$

Таким образом, погрешность позиционирования следящего привода можно свести практически к одной составляющей δ_c , которая определяется зоной нечувствительности при трогании $\delta_{тр}$ следящей системы:

$$\delta_c = 2\delta_{тр} = \frac{2I_{тр}}{k_d k_y} \quad (3)$$

где $\delta_{тр}$ – зона нечувствительности следящей системы; $I_{тр}$ – ток трогания системы; k_d – коэффициент передачи датчика положения; k_y – коэффициент усиления измерительной системы.

В предлагаемом механизме силы статического трения связаны с сифонным узлом (силы упругости и механический гистерезис) и с рабочей средой, МР-жидкостью (силы вязкого трения и их зависимость от магнитного поля).

Предыдущие расчеты упругой силы статического сопротивления проводились для случая, в котором сифон деформируется только в осевом направлении при перемещении вдоль оси z. Осевая жесткость сифона нормирована ГОСТом. Однако, как показано на рисунке 7, привод перемещается также и в горизонтальной плоскости, при этом сифон деформируется в поперечном направлении, а его торцы перемещаются плоскопараллельно, эта деформация носит название поперечного изгиба.

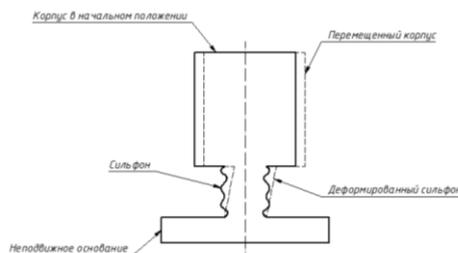


Рис. 8. Схема поперечного изгиба сифонного узла в механизме

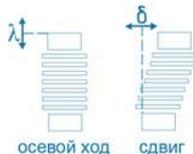


Рис. 9. Деформации сифонного узла

Для определения жесткости вакуумного сифона на поперечный изгиб, было проведено два расчета: с помощью программы Ansys и на основе научных работ Феодосьева В.И. [7] и Андреевой Л.Е. [8]. Полученные результаты различались достаточно сильно. Имея такое большое расхождение значений, было принято решение провести эксперимент.

Исследование жесткости сифона при поперечном изгибе

Для проведения эксперимента спроектирована оснастка для установления сифона на станине и каретке универсального измерительного микроскопа УИМ-23. Схема эксперимента представлена на рис. 10.

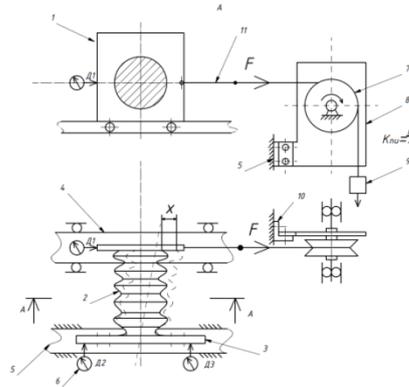


Рис. 10. Схема эксперимента

1- Пластина для крепления сиффона к подвижной каретке; 2- Сиффон; 3- Пластина для крепления сиффона к неподвижному основанию; 4- Подвижная каретка; 5- Станина УИМ- 3; 6- Датчик; 7- Блок; 8- Трос; 9- Груз; 10- Уголок для крепления блока к станине УИМ-3; 11-Результирующая сила



Рис. 11. Фото экспериментального стенда

Сиффон крепится к двум пластинам с помощью четырех болтов с одной стороны и одного большого с другой. Неподвижная пластина крепится уголку, а тот - к станине микроскопа с помощью четырех болтов, закрученных в глухие отверстия. Подвижная пластина с помощью болтов крепится к уголку, соединяющему два уголка, сделанные для крепления к подвижной каретке микроскопа. На подвижную пластину ставится датчик перемещения, а также крепится трос, перевешенный через блок, прикрученный к пластине, которая через уголок крепится к станине микроскопа в боковые крепежные отверстия. На трос подвешивается груз.



Рис. 12. Внешний вид УИМ-23

Микроскоп универсальный измерительный УИМ-23 предназначен для измерения линейных и угловых размеров изделий координатным методом с помощью оптической визирной системы. В частности, на приборе можно измерять резьбовые изделия, режущий инструмент, продольные шаблоны и лекала, кулачки, конусы, метчики, резьбонарезные гребенки, диаметры малых отверстий шаг, резьбы. По полученным координатам точек координатно-оптическим устройством определяются диаметры, радиусы, центра окружностей, точки пересечения, расстояния, углы[9].

Технические характеристики:

- Пределы измерений 200x100 мм.
- Диапазон измерения углов 0...360 град.

- Габаритные размеры:
- микроскопа 1400x1300x1000 мм
- подставки 985x730x630 мм.
- Масса микроскопа 460 кг; подставки 142 кг.

По полученным данным о средней деформации сальфона был построен график зависимости деформации сальфона от массы подвешиваемого груза (рис 12). По полученному графику можно сделать вывод, что зависимость линейная.

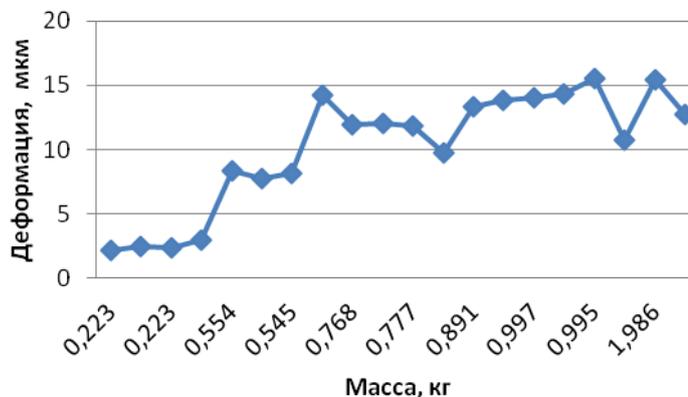


Рис. 13. Результаты эксперимента

Определим жесткость сальфона на основании закона Гука:

$$F = kx \tag{5}$$

$$k = \frac{F}{x}$$

где:

F– величина сдвигающей силы, Н;

x – величина деформации, мм;

Таким образом, жесткость сальфонного узла механизма составляет:

$$k = \frac{10}{0.14} = 71.2 \frac{Н}{мм}$$

Полученная величина жесткости показывает, что теоретический расчет, выполненный на основании работ Феодосьева В.И. и Андреевой Л.Е. (82,8 Н/мм), лучше согласуется с полученными экспериментальными данными, чем программа Ansys (47 Н/мм).

Исследование тока трогания магнитореологической жидкости

Был проведен эксперимент по установлению зависимости максимального давления, которое может задерживать затвердевшая жидкость в рабочем зазоре, от воздействия приложенной на электромагнитную катушку силы тока. Полученные данные позволят определить область рабочих давлений привода при определенных значениях электрического тока [10].

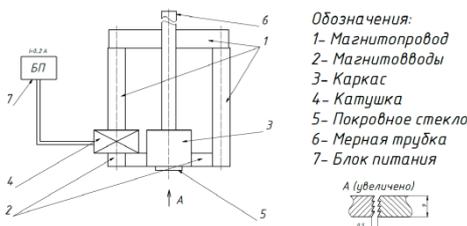


Рис. 14. Схема эксперимента



Рис. 15. Оснастка эксперимента

МР жидкость поступает под контролируемым давлением в рабочий зазор. При подаче тока на электромагнитную катушку, создается магнитное поле, пронизывающее рабочий зазор. В этом месте суспензия повышает свою вязкость, тем самым понижая пропускную способность канала. При увеличении магнитного поля достигается момент, когда МР жидкость в рабочем зазоре полностью затвердевает и течение прекращается. Затем начинается повышение давления с целью возобновления течения жидкости через рабочий зазор. При достижении предела текучести структуры частиц в рабочем зазоре записываются результаты приложенного магнитного поля и величина давления.

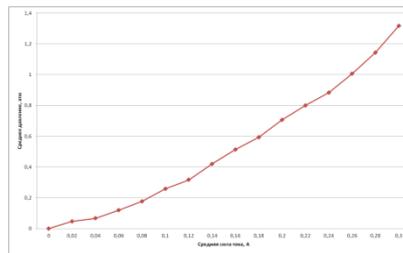


Рис. 16. Экспериментальная зависимость давления в зазоре от силы тока

По полученным результатам можно сделать вывод, что характер зависимости прочности образующейся в рабочем зазоре пробки нелинейный. Чем больше ток на катушке, тем большее давление может задержать образовавшаяся из жидкости пробка.

Выводы

1. Магнитореологические механизмы обеспечивают высокую точность позиционирования.
2. Замкнутая система управления в совокупности с современным исследовательским оборудованием позволяет повысить точность привода, исключая измерительную погрешность и погрешность, связанную с возмущающими силами и начальными условиями.
3. Точность привода в наибольшей степени зависит от погрешности, которая определяется зоной нечувствительности при трогании следящей системы.
4. Деформация сильфона от величины нагрузки имеет линейный характер. Коэффициент жесткости сильфона приблизительно равен 71,2 Н/мм.
5. Теоретический расчет, выполненный на основании работ Феодосьева В.И. и Андреевой Л.Е., лучше согласуется с полученными экспериментальными данными, чем программа Ansys.

Литература

1. Gilbertson, Roger G. The 10 (or 11) Basic Ways. Mondo-tronics, Inc. • RobotStore.com, 2004.
2. Item # 5183 .Получено 29.11.2014 г., из POSTRA:
<http://rostravernatherm.thomasnet.com/item/all-categories/thermal-actuators/pn-1017>
3. M-272 Linear Drive for Automation.б.д.
<http://www.physikinstrumente.com/en/products/prspecs.php?sortnr=1000650> (дата обращения: 16 декабрь2013 г.).

4. Damcos BRC 125 . б.д. http://www2.emersonprocess.com/en-US/brands/damcos/products/Valve-Remote-Control-Systems/Hydraulic-Acutators/brc/Pages/1_Damcos%20-%20BRC%20125.aspx (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).
5. *Eugeni A. Deulin, V. P.* (2000). Control of adaptive optic elements displacement with help of magnetic rheology drive. Moscow: SPIE.
6. *В.П. Михайлов, А. Б.* Исследование параметров механизмов микро- и наноперемещений: метод. указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Прецизионные механизмы микро- и наноперемещений» . М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 73 с.: ил.
7. *В.И. Феодосьев.* Соппротивление материалов. Изд. 10-е. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.: ил.
8. *Л.Е. Андреева.* Расчет упругих элементов машин и приборов М.: Машиностроение, 1980-326с., ил – (Б-ка расчетчика)
9. Микроскоп универсальный УИМ-23. (б.д.). Получено 15.12.2014 г., из АСМА-Прибор: http://asma-pribor.ru/catalog/microscopes/micro_uim_23.html
10. *М.С. Мосина.* (2014). Моделирование технологического процесса протекания магнито-реологической жидкости через зазор в магнитном поле.

УДК 539.1, 621.3

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Мьо Чжо Хлаинг

Аспирант 1 года

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Л.Л. Колесник

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Общие сведения об ионных кластерах

Кластером называют систему связанных между собой атомов или молекул какого-либо вещества. Такое образование представляет собой промежуточную фазу между молекулярным состоянием вещества и его конденсированным состоянием.

В 1988 г. в экспериментальной лаборатории ионно-пучковых технологий университета г. Киото под руководством профессора И. Ямады был создан ускоритель пучков газовых кластерных ионов. Результаты экспериментальных исследований, полученных в этой лаборатории, продемонстрировали широкие возможности применения кластерных ионов в таких промышленных технологиях, как ионно-ассистированное осаждение тонких пленок, очистка и полировка поверхности, имплантация ионов на малые глубины [1].

Кластеры показывают физические и химические свойства, отличные свойств материала в конденсированном состоянии, что позволяет искать новые технологические возможности для применения известных материалов.

Число молекул, находящихся в связанном состоянии, при котором можно говорить о кластере лежит в диапазоне от 10 до 10000. При количестве молекул меньше четырех обычно говорят о мономерах, димерах и тримерах. При количестве молекул более 10000 происходит переход к микроскопической области и уже можно говорить об объемных объектах и конденсированном состоянии вещества.

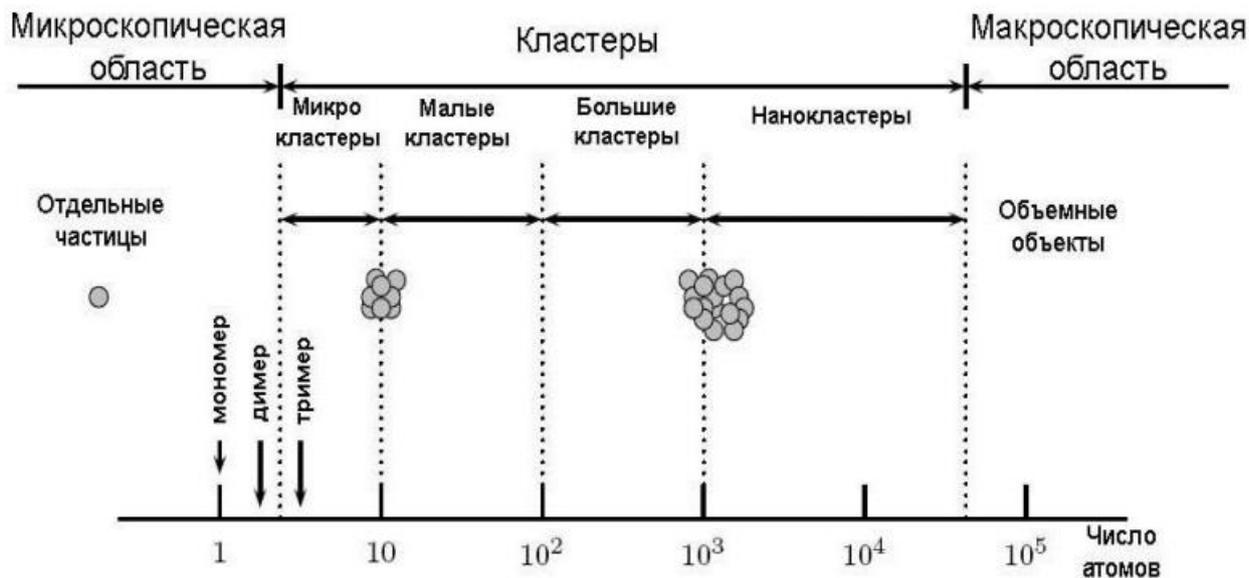


Рис. 1. Место кластеров в мире микро и нанобъектов [2]

Если в кластере объединяются заряженные частицы, то говорят о существовании кластерных ионов. Кластерным ионом также может называться скопление нейтральных атомов, которое имеет заряд как система в целом.

С изменением размера кластера меняются его физические свойства. Малые кластеры с количеством атомов менее 100 меняют свои свойства в зависимости от структуры молекул, из которых они состоят. Кроме того, на их свойства при взаимодействии с макрообъектами существенное влияние оказывает состояние поверхности взаимодействия. С увеличением количества молекул в кластере их свойства стабилизируются и, как правило, являются линейными функциями. По мере дальнейшего роста количества молекул и атомов в кластере их свойства приближаются к свойствам вещества в конденсированном состоянии. Исходя из этого при исследовании свойств кластеров очень важно четко понимать физическую и химическую структуру молекул, их составляющих, размер кластера, наличие или отсутствие заряда кластера как единого объекта.

Способы получения ионных кластеров

Получить кластеры, которые в дальнейшем будут сформированы в пучок, можно несколькими различными приемами. Для этого необходимо либо разрушить большие скопления атомов, либо соединить малые объекты (атомы, молекулы, небольшие кластеры).

Один из способов – это получение готовых кластеров из твердого тела или жидкости при эрозии поверхности, когда некое воздействие приводит к распылению, в результате чего образуются различные осколки, включая и заряженные кластеры. В качестве такого воздействия можно использовать интенсивное лазерное излучение, электродуговой разряд, магнетронный разряд, ионный или электронный пучок. Полученные кластеры состоят из небольшого числа атомов. Они могут быть сформированы в пучки, разделены по массам и энергиям и ускорены. Однако интенсивность таких пучков достаточно низкая, в связи с чем, их использование ограничивается исследовательскими целями.

Другой возможностью получения кластеров является их образование и дальнейший рост при использовании процессов связанных с конденсацией газа или пара. Для этого обычно используется охлаждение атомарного пара при его сверхзвуковом расширении или охлаждение в буферном газе.

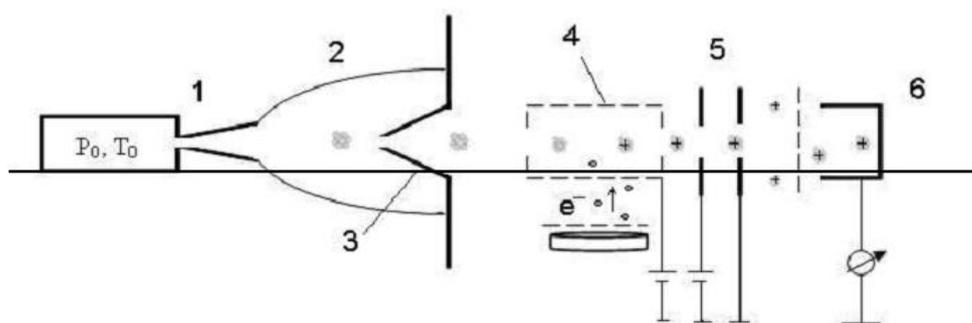
Расширение газа истекающего из сопла приводит к его адиабатическому охлаждению. При этом параметры газа оказываются за кривой фазового равновесия, и появляется возможность возникновения его конденсации. После расширения газа из сопла его плотность

резко падает, а значит ограничено и время, в течение которого происходят процессы нуклеации газа. В связи с этим при использовании данного метода необходима реализация условий, связанных с давлением газа и параметрами его расширения [3].

Метод охлаждения в буферном газе можно применить фактически к любым атомам, молекулам и их кластерам не зависимо от состава или совмещать со сверхзвуковым расширением получая высокоэффективное охлаждение [4]. При этом охлаждаемые частицы будут совершать множественные столкновения с низкоэнергетическими атомами буферного газа, например гелия. Следует заметить, что такой метод охлаждения является высокоэффективным, так как происходит воздействие на весь диапазон распределения Максвелла-Больцмана и обеспечивается охлаждение поступательных и вращательных степеней свободы. Возможности этого метода позволяют получать охлажденные молекулы в больших количествах. Главным неудобством является возрастание технической сложности охлаждающего устройства при уменьшении его температуры.

Таким образом, принцип действия кластерных источников основан или на разрушении (распылении) вещества, или на скоплении (конденсации), а иногда на обоих методах, что позволяет конструировать различные типы таких источников, которые дают возможность получать широкий спектр кластеров с различными размерами и свойствами.

В работе [10] представлены экспериментальные результаты формирования ионно-кластерных пучков из сверхзвуковых струй Ar. Работа выполнена на газодинамическом комплексе ЛЭМПУС-1 Новосибирского государственного университета. Принципиальная схема экспериментов приведена на рисунке 2.



1 – Сверхзвуковое сопло, 2 – Газовая струя, 3 – Скиммер, 4 – Ионизатор, 5 – Ионная оптика, 6 – Коллектор.

Рис. 2. Принципиальная схема источника кластерных ионов [10]

Для целей создания интенсивного ионно-кластерного пучка необходимы кластеры большого размера. Известно, что при одинаковых параметрах торможения (давление торможения P_0 , температура торможения T_0) сверхзвуковые сопла позволяют формировать кластеры большего размера по сравнению со звуковыми соплами. Поэтому эксперименты были проведены со сверхзвуковым коническим соплом (1), имеющим диаметр критического сечения $d=0,19$ мм и полуугол раствора $\alpha=6^\circ$. Молекулярный пучок формировался с помощью скиммера (3) с диаметром входного отверстия $d_s=1$ мм. Ионизация кластеров осуществлялась электронным ударом в ионизаторе (4). Источником электронов являлась таблетка гексаборид лантана. Ионизованные частицы из пучка вытягивались из ионизатора и ускорялись до нужной энергии с помощью ионной оптики (5). Характеристики ионно-кластерного потока измерялись с помощью коллектора ионов (6) методом задерживающего потенциала.

В работе [7] установлено, что для модификации поверхности необходимы интенсивные потоки кластеров размером до 10^3 с энергией до 30-40 кэВ и дозами облучения до 10^{15} - 10^{17} ионов/см². Однако, кинетическая энергия, набираемая кластером при свободном сверхзвуковом истечении, определяется начальной энтальпией покоящегося газа и, как правило, не превышает 0,1 эВ на одну частицу кластера (атом или молекулу), что недостаточно для обработки

поверхности. Для ускорения необходимо ионизировать кластеры, а затем ускорить до нужной энергии в электрическом поле. Известно, что пороговая энергия ионизации (~10-20 эВ) заметно превышает энергию связи частиц в газовом кластере (от 0,1 до 5 эВ). Очевидно, при ионизации кластеров возможен их развал (фрагментация), что может приводить к уменьшению интенсивности ионно-кластерного пучка.

Наиболее перспективным способом достижения таких параметров является формирование молекулярного пучка из сверхзвуковой газовой струи с последующей его ионизацией и ускорением. Подбирая геометрию сопла и варьируя исходные параметры газа (давление и температуру торможения) можно сформировать сверхзвуковой пучок кластеров требуемых размеров. Таким образом, получение нейтрального кластерного пучка высокой интенсивности является необходимым условием для последующего формирования ускоренного ионно-кластерного потока.

Применение ионных кластеров для модификации поверхности

За последние годы предпринимались многочисленные попытки использовать особенности взаимодействия газовых кластерных ионов с твердым телом для решения актуальных научных и практических задач.

Рассмотрим анализ основных результатов в применении кластерных ионов для снижения шероховатости поверхности.

Увеличение дозы облучения при обработке материалов кластерными ионами приводит к сглаживанию рельефа. Этот эффект отчетливо наблюдался при бомбардировке поверхности меди ионами мономеров Ag и кластерными ионами $Ag_{(2000)}$ с энергиями 20 кэВ, падающими вдоль нормали к поверхности [5].

Изображения необлученной и облученной поверхности Cu, полученные в атомносиловом микроскопе (АСМ), представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что в случае облучения кластерными ионами достигается значительно меньшая шероховатость поверхности. Эксперименты показали, что средняя шероховатость стабилизируется на уровне 1,3 нм при достижении дозы облучения кластерами $5 \cdot 10^{15}$ ион/см².

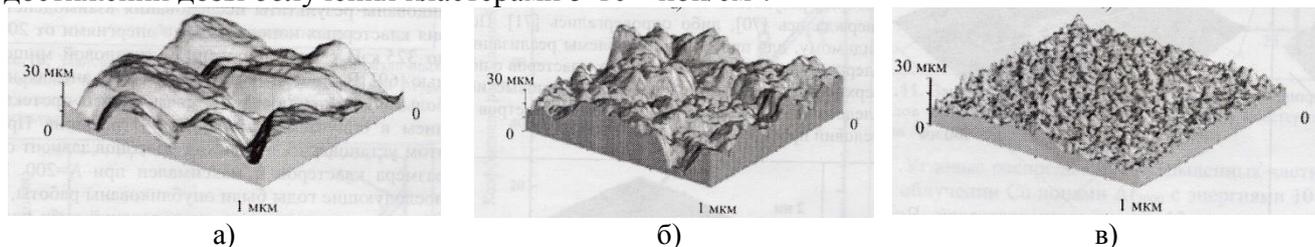


Рис. 3. Изображение поверхности меди а) – исходное, б) – после обработки мономерами Ag с энергией 20 кэВ, в) – ионными кластерами $Ag_{(2000)}$ с энергией 20 кэВ [5, 6]

Многочисленные исследования продемонстрировали, что с помощью пучков газовых кластерных ионов можно улучшить качество рельефа поверхности практически всех материалов. Уменьшение средней шероховатости поверхности FeNi-пленок, которые применяются для покрытия магнитных головок в жестких дисках, от 10,2 до 2,3 Ангстрем наблюдалась при облучении кластерными ионами Ag. А в работе (63) продемонстрировано, что после облучения поверхности алмазных пленок ионами Ag_{2000} с энергией 20 кэВ и дозе 10^{17} ион/см² средняя шероховатость пленок уменьшается от 40 до 10 нм. В этих экспериментах продемонстрировано, что сглаживание рельефа наблюдается лишь при нормальном падении пучка кластерных ионов.

Все работы показывают что, несмотря на высокий коэффициент распыления, при сглаживании рельефа с поверхности материала удаляется небольшой слой.

Наиболее популярной теорией, описывающей формирование рельефа под действием облучения ионов мономеров, в настоящее время является теория Харпера-Брэдли и её модификации. Согласно этой теории рельеф поверхности формируется в результате

конкурирующего действия двух механизмов. Локальная зависимость коэффициента распыления Y от угла падения ионов стремится развить неровности поверхности, а поверхностная миграция атомов сгладит рельеф. Взаимодействие этих двух процессов и определяет результат ионной обработки.

Сглаживание рельефа, наблюдающееся при облучении поверхности кластерными ионами, также можно объяснить с точки зрения теории Харпера-Брэдли. Очевидно, что подвижность атомов в зоне падения кластерного иона значительно выше, чем при падении иона мономера. С другой стороны, установлено, что в отличие от случая бомбардировки мономерами коэффициент распыления при облучении кластерными ионами убывает с ростом угла падения пучка: $Y(\alpha) \sim \cos\alpha$ [7]. В силу этого ослабевает роль распыления в развитии рельефа. По-видимому, такое соотношение двух конкурирующих факторов и приводит к сглаживанию рельефа.

Поскольку кремний по-прежнему является основным материалом электронной техники, в рассматриваемых работах проблеме обработки кремниевых пластин уделялось значительное внимание. Облучение кластерными ионами применялось для создания фотонных структур на основе кремниевых пластин и для сглаживания рельефа. С использованием химически активных кластерных ионов $(SF_6)_N$, ускоренных до энергии 30 кэВ, была получена средняя шероховатость $\sim 0,1$ нм [8]. А в работе [9] пластины кремния (100) облучались кластерными ионами этанола с энергией 9 кэВ. Для бомбардировки пластин использовались кластеры с размером более 95 молекул. Также как и для других кластерных ионов наблюдалось сглаживание рельефа, причем средняя шероховатость составляла менее 1 нм.

Основные выводы

Проведенный анализ литературных источников показывает большой интерес к вопросам получения и применения ионных кластеров для применения не только в научных, но и практических целях. Ионные кластеры находят применение в электронной промышленности для сглаживания рельефа, имплантации, напыления тонких пленок.

Причем использование кластерных ионов в сравнении с классическими ионными пучками из мономеров приводит к снижению количества дефектов обрабатываемой поверхности при сохранении основных технологических результатов.

Весь рассмотренный материал говорит о перспективности исследований и разработки технологии снижения шероховатости поверхностей при изготовлении изделий электронной техники с использованием ионных кластеров.

Литература

1. *Yamada I.* A short review of ionized beam technology. – Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B, 1995, vol. 99, p. 55
2. *Карпенко А.Ю., Батулин В.А.* Источники кластерного пучка. Часть 1. Методы получения кластерных пучков // Журнал Нано- и электронной физики. Сумской государственный университет – Том 4 № 3, 2012 г.
3. *В.С. Авдеевский, Э.А. Ашаратов, А.В. Иванов, У.Г. Пирумов* Сверхзвуковые неизобарические струи газа – М., Машиностроение: 1985
4. *R. deCarvalho, J.M. Doyle, B. Friedrich, T. Guillet, J. Kim, D. Patterson, J.D. Weinstein* Eur. Phys. J. D7. 289 (1999)
5. *Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Kirpatrick A.* Material processing by gas cluster ion beam. – Mater. Sci. and Engineer., 2001, vol. R 34, p. 231.
6. *Андреев А.А., Ермаков Ю.А., Патракеев А.С., Черныш В.С.* Применение кластерных ионов в нанотехнологии // Нанотехнологии: разработка и применение, № 1, т. 1, 2009 г., с. 23-38
7. *Kitani H., Toyoda N., Matsuo J., Yamada I.* Incident angle dependence of the sputtering effect of Ar-cluster-ion bombardment. – Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1997, vol. 121, p 489.

8. Yamada I., Toyoda N. Recent advances in R&D of gas cluster ion beam processing and equipment. – Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B., 2005, vol. 241, p. 589.
9. Takaoka G.H., Noguchi H., Kawashita M. Interactions of ethanol clusters ion beams with silicon surfaces. – Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 2006, vol. 242, p. 417.
10. Коробейщиков Н.Г., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Шмаков В.В. Формирование ускоренных ионно-кластерных пучков аргона для модификации поверхности // // Вакуумная наука и техника: Материалы XIX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, 2012 г. с. 166-169.

УДК 621.793.182, 621.893

Трибологические наноструктурные покрытия, формируемые методом распыления композитных мишеней

Владимир Николаевич Калинин⁽¹⁾, Мария Григорьевна Попова⁽²⁾

Магистр 1 года⁽¹⁾, студент 4 курса⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: А.И.Беликов

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается расширение спектра номенклатуры тонкопленочных покрытий машиностроительного назначения для разных областей науки и техники. Существенное влияние на динамику этого процесса оказывает интенсификация исследований в сфере нанотехнологий, разработка новых наноструктурных и нанокompозитных покрытий, развитие методов вакуумного нанесения тонких пленок. Нанокompозитные тонкопленочные покрытия, содержащие в своем составе твердые и твердосмазочные материалы, представляют практический интерес благодаря повышенным трибологическим характеристикам, которыми обладают. При этом, химический и фазовый состав, геометрические характеристики структуры композита определяют результирующие трибологические и механические свойства покрытия. Современные исследования показывают, что даже небольшие отклонения в стехиометрическом составе покрытия могут приводить к значительному изменению свойств.

При реализации технологии путем одновременного осаждения компонентов покрытия из нескольких потоков, сформированных ионным распылением отдельных мишеней, (например, Ti+Al и MoS₂), в результате чего формируется 3D-нанокompозитная структура покрытия, в разных областях поверхности осаждения соотношение компонентов может существенно отличаться. Поэтому в работе [1] была предложена технология, альтернативная такому варианту реализации, и позволяющая повысить однородность стехиометрического состава покрытия, особенно для крупных деталей. Реализуется такая технология путем формирования общего потока осаждаемых компонентов покрытия за счет распыления единой прессованной композитной мишени, содержащей все компоненты, что обеспечивает не только повышение однородности состава покрытия, но также и снижение сложности и стоимости технологической системы оборудования (уменьшение количества источников и упрощение технологической оснастки).

Известно, что механические свойства большинства материалов испытывают значительные изменения в субмикронных масштабах. Влияние масштабного фактора особенно сказывается на параметрах, характеризующих переход от упругого к упругопластическому

деформированию, а также на механизмах зарождения и протекания начальных стадий пластической деформации. Следовательно, изучение твердости наноструктурных покрытий, формируемых методом распыления композитных мишеней, является актуальной задачей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения образцов трибологических наноструктурных покрытий использовалась распыляемая мишень, полученная перемешиванием смеси порошков Ti+Al+MoS₂ (в следующих пропорциях: Ti – 40 ат.%, Al - 47,5 ат.%, MoS₂ - 12,5 ат.%) с последующим холодным прессованием [2]. Внешний вид экземпляра готовой мишени диаметром 78 мм, представлен на рис.1.

Для проведения работ по нанесению покрытий использовалась вакуумная технологическая установка кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ имени Н.Э.Баумана, оснащенная автономным источником ионов и сбалансированными магнетронными распылительными системами под планарные мишени диаметром 78 мм (рис.3). Вакуумная система установки состоит из механического форвакуумного и паромасляного насосов и обеспечивает достижение остаточного вакуума в технологической камере на уровне 10⁻³ Па. Двухканальная газовая система с компьютерным управлением обеспечивает формирование газовой смеси требуемом соотношении на основе рабочего (аргон) и реактивного (азот) газов. Нанесение покрытий осуществлялось при давлении аргона порядка 10⁻¹ Па. Покрытия наносились одновременно на полированные ситалловые подложки и на пластинки из стали X18H10T, шероховатость поверхности которых составляла порядка 0,4 Ra. Перед нанесением покрытий предварительно выполнялась подготовка поверхности подложек, состоящая из двух этапов:

1 этап - промывка в ультразвуковой ванне в ацетоне ОСЧ 9-5 – 10 мин; в этиловом спирте – 10 мин.;

2 этап - обработка поверхности потоком ионов аргона из автономного источника ионов типа «Радикал» с холодным катодом при следующих режимах: давление в камере – 7*10⁻⁴ Торр, плотность ионного тока на подложке – 150 мкА/см², время обработки – 30 мин.

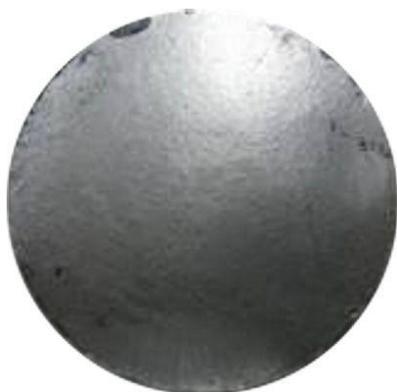


Рис. 1. Внешний вид прессованной мишени и вакуумной установки, используемой для нанесения покрытий методом магнетронного распыления

Целью проводимых исследований являлось исследование твердости нанокompозитных покрытий, формируемых методом распыления многокомпонентной мишени. В работе [1] представлены результаты исследования химического состава полученных покрытий и особенности распыления многокомпонентной прессованной мишени на основе металлов (титан и алюминий) и дисульфида молибдена, используемой в процессе нанесения пленок.

Сущность методов нанесения тонких пленок путем распыления в вакууме, бомбардируемой ионами инертного газа, мишени заключается в кинетическом воздействии ускоренных тяжелых ионов инертного газа, как правило, аргона, на поверхность мишени из распыляемого материала, в результате чего образуется поток пленкообразующих частиц, осаждаемых на поверхность изделия. Метод обеспечивает формирование качественных покрытий на основе самых разнообразных материалов, включая тугоплавкие металлы, практически любые неорганические материалы, используемые в современной технике, поддаются распылению ускоренными ионами и на их базе могут быть сформированы покрытия сложного состава и структуры, включая оксиды и нитриды металлов.

Среди методов распыления широкое промышленное распространение получил метод магнетронного распыления, обеспечивающий процесс при более низких давлениях и более высокие скорости роста пленок. В магнетронной распылительной системе повышенные характеристики достигаются за счет применения скрещенного магнитного и электрического полей, что приводит к возникновению аномального тлеющего разряда и увеличению плотности плазмы. Применение в магнетронных распылительных системах современных источников питания дает возможность стабилизировать процесс по различным параметрам: току, напряжению, мощности, что обеспечивает высокую управляемость процессом напыления и качество получаемых покрытий.

Для изучения механических характеристик композитных покрытий были отобраны два образца, режимы напыления которых, приведены в таблице 1:

Толщина покрытий, полученных на свидетелях, измерялась на атомно-силовом микроскопе (АСМ) "Solver-NEXT" компании "NT-MDT". Измеренная толщина для покрытий составила примерно 4 мкм.

Таблица 1. Режимы нанесения покрытий на образцы

	Режим работы магнетрона	Давление в камере, Торр	Напряжение разряда, В	Ток разряда, А	Потенциал смещения на подложку, В
Образец №1 (15.04)	постоянный	$8 \cdot 10^{-4}$	460	0,9	60
Образец №2 (04.06)	импульсный	$8 \cdot 10^{-4}$	710	0,9	62

НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ

Одним из основных современных методов исследования механических свойств материалов в наномасштабе является метод наноиндентирования (далее НИ) или индентирования (depth-sensing indentation), заключающийся в прецизионном нагружении плоской поверхности образца индентором с одновременной регистрацией усилия внедрения P и глубины внедрения h , что позволяет локализовать деформацию в субмикронной области исследуемого материала.

Определение твердости и модуля упругости поверхности полученных образцов проводилось путем наноиндентирования на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) "Solver-NEXT" компании "NT-MDT" с использованием наносклерометрической головки с трехгранным алмазным индентором Берковича. Принцип работы прибора при наноиндентировании следующий. Наконечник индентора, перпендикулярный к поверхности образца, вдавливаются в нее, путем приложения возрастающей нагрузки до предварительно заданной величины. Выдерживается заданное время при максимальной нагрузке, и затем её постепенно снижают.

Рисунок 2 иллюстрирует общую схему нагружения – разгрузки и фиксируемые параметры, из которых по методике Оливера – Фарра оценивались модуль Юнга (E), контактная жесткость ($S = dP/dh$), твердость ($H = P_{max}/A$), где A – площадь проекции отпечатка.

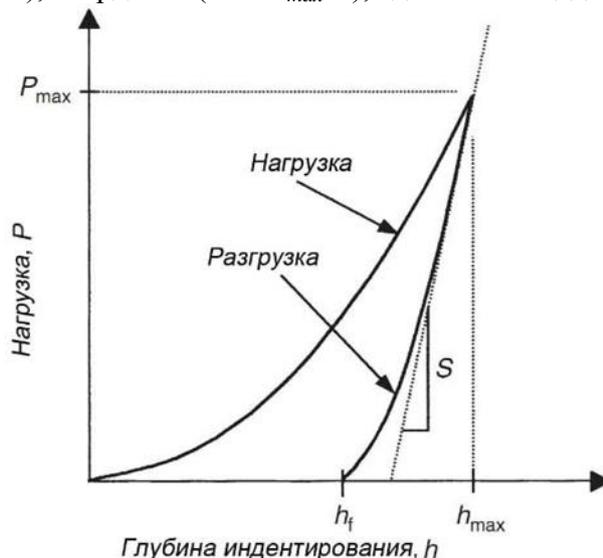


Рис. 2. Схема нагружения и разгрузки образца

Методика измерений:

1. Образца закрепляется на опорной поверхности перпендикулярно к направлению индентирования.

2. В испытательном цикле задаются: диапазон прикладываемых нагрузок, скорость нагружения, число измеряемых точек.

3. Во время выполнения измерений установка должна быть защищена от ударов и вибраций, воздушных потоков и температурных колебаний, которые могут значительно повлиять на результаты измерений.

4. Важно, чтобы на результаты измерений не влияло наличие в области контакта границ образца наплывов и впадин, вызванных предыдущим индентированием в серии. Эти факторы влияют на свойства образца, поэтому минимальное расстояние между отпечатками должно, как минимум, в 5 раз превышать самый большой диаметр отпечатка [3].

Настройка оптического датчика и создание калибровочной записи проводились по эталону (кварцу) с твердостью $H=9,5\pm 0,5$ ГПа. Калибровочная запись создавалась по 100 точкам.

Параметры измерений:

- Скорость приближения образца к зонду и обратно 20 секунд на измерение;
- Диапазон нагрузки от 1 до 8 мН для первого образца и от 1 до 7 мН для второго; для определения каждого значения параметров выполнялось до 10 уколов;
- Размер площади индентирования 50x50 мкм;
- Количество измеряемых точек - 49.

Наноиндентирование проводилось на образцах с покрытием на ситалловых подложках. Полученные результаты измерений представлены в таблице 2. В таблице 3 также приведен химический состав исследуемых покрытий.

Таблица 2. Результаты измерений

	Твердость H , ГПа	Модуль упругости E , ГПа
Образец №1 (15.04)	5,21	66,06
Образец №2 (04.06)	3,97	34,97

Таблица 3. Химический состав покрытий (данные в атомных процентах), нанесенных распылением мишени Ti+Al+MoS₂ на ситалловые подложки [1]

№ покрытия	Al, %	Ti, %	MoS ₂ , %
Образец №1 (15.04)	51,94	33,61	14,45
Образец №2 (04.06)	51,52	36,07	12,41

После НИ дополнительно проводилось сканирование проработанной области для оценки качества полученных отпечатков. На рис. 3 представлен скан поверхности образца №1 после индентирования, с периодической структурой отпечатков индентора на исследуемой поверхности. На изображении видно, что расстояние между отпечатками существенно (более чем в 5 раз) превышает диаметр одного отпечатка, что соответствует требованиям измерений согласно [3].

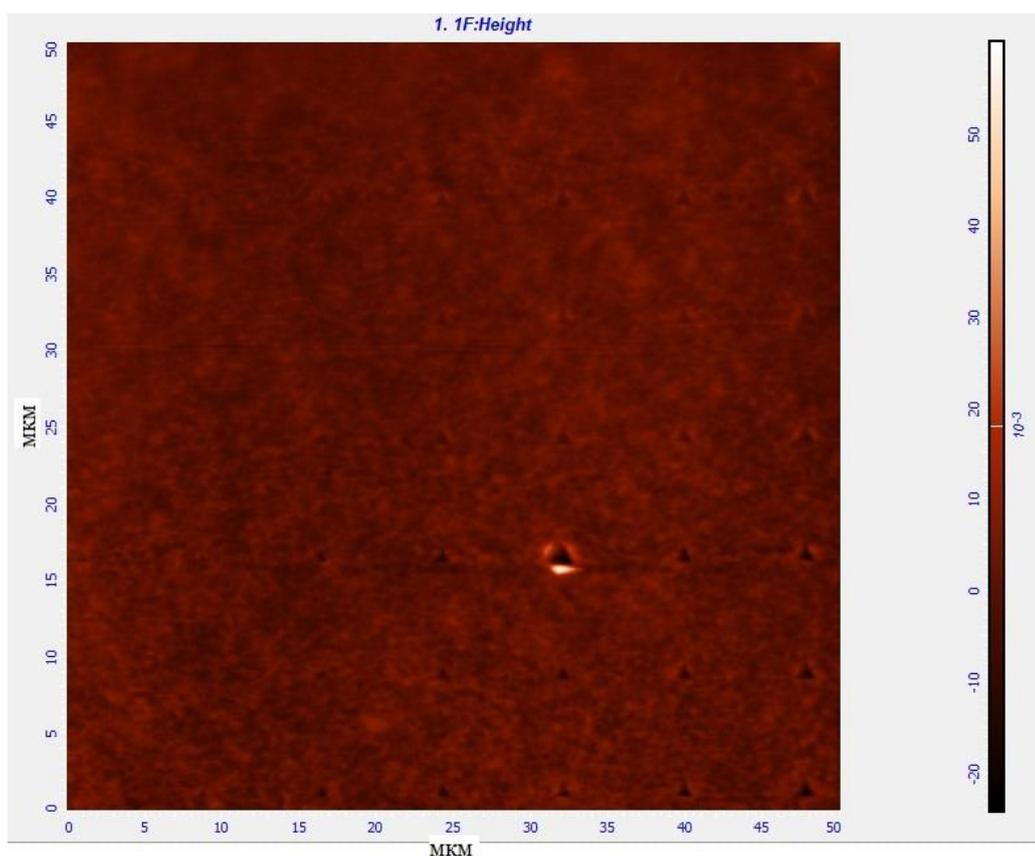


Рис. 3. Скан поверхности образца №1 (размер области 50x50 мкм)

На рисунке 4 представлен скан поверхности образца – а) и профиль отпечатка – б). Из рисунка 4б видно, что глубина проникновения индентора после снятия нагрузки составляет примерно 35 нм. Искажение геометрической формы в виде образования небольшого пластического навала вокруг отпечатка обычно возникает при внедрении индентора в мягкий материал.

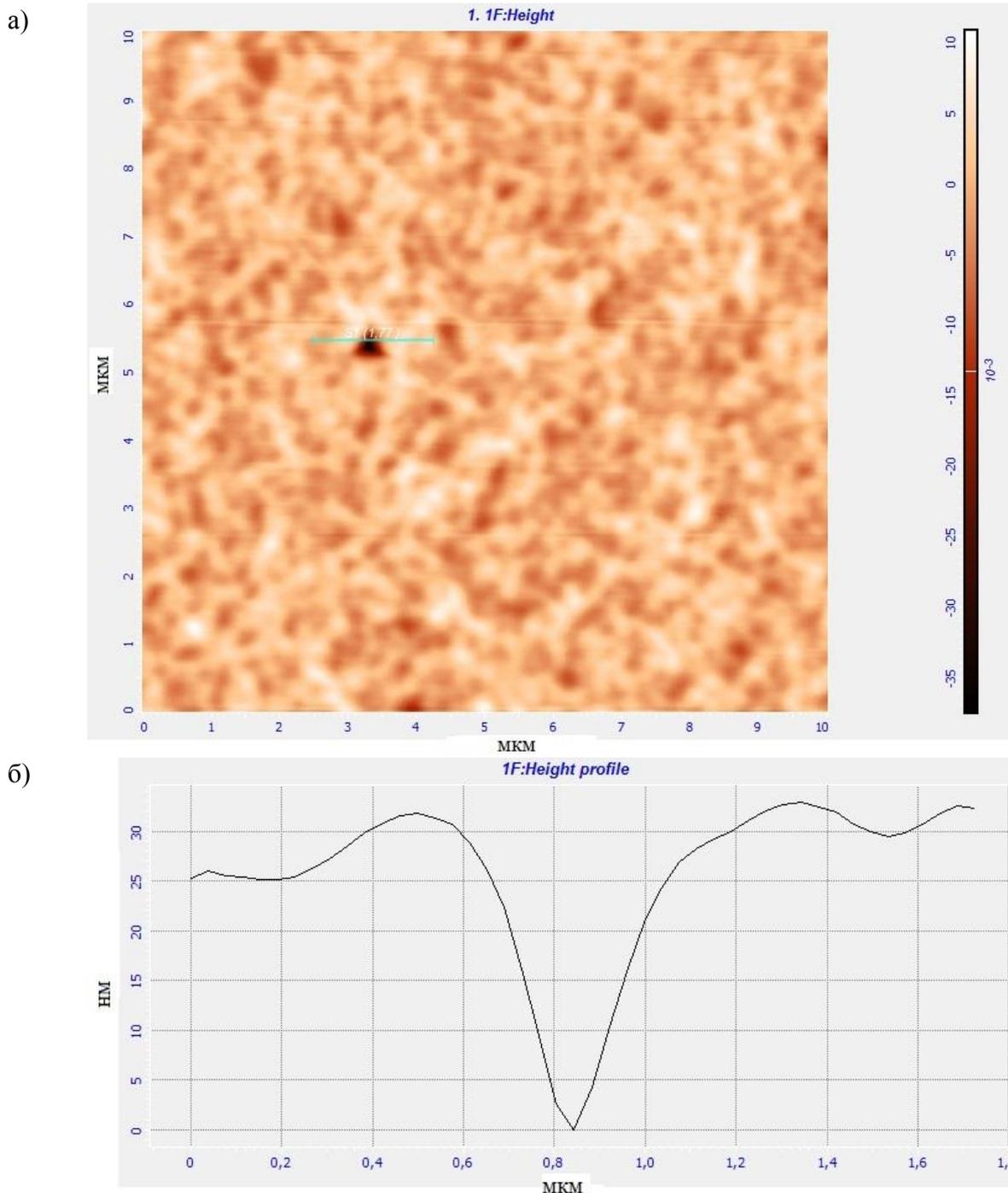


Рис. 4. Анализ отпечатка индентора:

а) скан поверхности образца (область 10x10 мкм); б) профиль поверхности после снятия нагрузки

Уместно заметить, что в некоторых опытах по наноиндентированию пленок при нагрузках менее 4 мН наблюдалось резкое повышение твердости при уменьшении нагрузки. Поэтому необходимо считаться с тем, что измерения при малых нагрузках сопровождаются резким повышением ошибок, особенно по параметру твердости [4]. Таким образом, по отношению к абсолютной величине получаемых при наноиндентировании деформационных параметров анализ является достаточно условным, и всякий раз требуется подробное обсуждение роли факторов возможного влияния на результат.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Независимо от режима работы магнетрона, с увеличением времени использования композитной мишени наблюдалось увеличение доли титана и одновременное снижение доли дисульфида молибдена в покрытии, при этом содержание алюминия практически не менялось [1].
2. Для покрытия №1 (большое содержание титана и малое дисульфида молибдена), полученного при импульсном режиме работы магнетрона, наблюдались более низкие значения твердости и модуля Юнга по сравнению с покрытием №2, в составе которого содержалась меньшая доля титана и большая доля дисульфида молибдена.
3. Для формирования более полной оценки качества полученных покрытий необходимы дополнительные измерения таких трибологических характеристик, как коэффициент трения и адгезия.

Литература

1. Калинин В.Н., Попова М.Г. Технология нанесения нанокompозитных тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления прессованных мишеней // Всероссийская научно-техническая конференция студентов «Студенческая научная весна 2014: Машиностроительные технологии». – М., 2014. – С.364-373.
2. Беликов А.И., Коробова Н.В., Никонов И.И., Берстнев М.В. Формирование комбинированных упрочняющих покрытий вакуумными ионными методами // Материалы 8-й Международной конференции «Пленки и покрытия – 2007». – С-Петербург, 2007. – С. 81-87.
3. ГОСТ Р 8.748—2011.
4. Андриевский Р.А., Калинин Г.В. Наноиндентирование и деформационные характеристики наноструктурных боридонитридных пленок // Физика твердого тела. – 2000, том 42, вып. 9.

УДК 544.22

ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК ДИСУЛЬФИДОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Алексей Станиславович Самарцев

Студент 4 курса

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.И. Беликов

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

ВВЕДЕНИЕ

Человек живет в эпоху информационных технологий – облик современности определяется ими так же, как когда-то в XIX веке он определялся движущей силой пара, а то и больше. Таким положением вещей мы обязаны электронике – именно она является физическим носителем и оператором информации, позволяющим работать с ней быстро, точно и в огромных объемах. Трудно переоценить значимость электронных технологий, что должно быть очевидно практически всем, ведь в кармане у почти каждого сегодня есть телефон или смартфон. Говоря об этих устройствах, стоит сказать, что эти устройства еще 20 лет назад считались фантастикой в духе летающих машин. Темпы развития электроники огромны.

Темпы развития электроники можно оценить с помощью степени интеграции – числа элементов на кристалле (обычно это транзисторы). Согласно закону Мура число элементов на кристалле удваивается каждые два года. Пока эта тенденция сохраняется. Увеличение числа элементов на кристалле сопровождается уменьшением размеров элементов. В своё время это превратило электронику в микроэлектронику. Теперь же можно говорить о переходе микроэлектроники в наноэлектронику.

Какие же проблемы необходимо решить для такого перехода? Одна из существенных проблем заключается в материале, применяющемся в микроэлектронике – кремнии, который, не может быть основным в производстве наноэлементов, в частности, нанотранзисторов. Для замены кремния учеными предлагается множество различных альтернатив. Одна из них – дисульфиды тугоплавких металлов, в частности, дисульфид молибдена. О нём и возможностях его применения в электронике пойдет речь в далее.

Целью данной работы является демонстрация возможностей применения дисульфида молибдена в электронике на основе обзора и анализа материалов исследований последних лет, выполненных во всём мире.

ОПЫТНЫЕ ОБРАЗЦЫ УСТРОЙСТВ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

- Флэш-память

Показательным примером применения дисульфида молибдена, как и графена, впрочем, является флэш-память. В ней исследователи предполагают использование двумерных вариантов этих материалов.

Двумерные материалы, такие как графен, монослой гексагонального нитрида бора или дисульфида молибдена являются самыми тонкими из известных материалов с электронными свойствами. Будучи толщиной всего в один слой они представляют собой возможный предел миниатюризации в вертикальном направлении, и их использование может уменьшить потерю энергии вследствие уменьшения токов утечки. Совокупность этих материалов может выступить как полный набор компонентов необходимых для построения электронной схемы: нитрид бора выступает как изоляционный материал подложки и подзатворного диэлектрика, графен – как проводящий слой соединяющий элементы схемы, а дисульфид молибдена, будучи полупроводником, выступает в роли активного слоя, в котором формируется полупроводниковый проводящий канал. Графен обладает полуметаллическими свойствами и может иметь прекрасный контакт с двумерным полупроводником, кроме того, он способен проводить токи высокой плотности, превышающей 10^9 А/см². В добавок к этому, недостаток ненасыщенных или свободных связей на поверхности раздела 2D полупроводника и графена подавляет формирование поверхностных состояний и ловушек заряда. Роль, которую играет графен электростатически или химически управляема. Таким образом, использование графена может быть адаптировано к широкому кругу двумерных полупроводников исполняющих разные функции и имеющие различные ширины запрещённых зон.

В работе, опубликованной в журнале Американского химического общества, представлен один из возможных вариантов ячейки флэш-памяти с использованием двумерного MoS₂ и графеновых электродов [1]. Принцип работы представленной ячейки схож с принципом работы полевого транзистора на двумерной структуре MoS₂ и имеет быстроедействие сопоставимое с ним [2]. Кроме того, такая ячейка может служить прототипом для более развитых устройств, основанных на 2D архитектуре. Энергонезависимая ячейка памяти представляет собой транзистор с полупроводниковым монослоем MoS₂ к которому добавлен плавающий затвор выполненный из нескольких слоёв графена.

В современной технологии флэш-памяти серьёзные затруднения вызывает дальнейшая миниатюризация устройств на их основе, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. С одной стороны вертикальная миниатюризация ведёт к уменьшению напряжений необходимых для записи или стирания, но с другой стороны на неё есть

ограничения: плавающий затвор должен удерживать на себе заряд. Минимальная толщина оксида, необходимая для этого, составляет примерно 5 нм.

В то же время миниатюризация в горизонтальном плане увеличивает ёмкость памяти, что сказывается на быстродействии. К сожалению, миниатюризация по горизонтальным направлениям приводит к образованию разностей потенциала между электродом стока и плавающим затвором, что приводит к длительному влиянию электрического поля электрода стока на полупроводниковый канал. Помимо этого усиленное взаимодействие между соседними ячейками памяти приводит к нежелательному разбросу значений порогового напряжения в устройстве. Уменьшение толщины электрода может уменьшить взаимодействие между электродом и плавающим затвором, уменьшение толщины же плавающего затвора уменьшает взаимное влияние соседних ячеек [1].

Обозначенные выше проблемы миниатюризации открывают перспективы для использования 2D материалов, которые могли бы заменить традиционные, в устройствах памяти. Использование таких материалов позволит улучшить характеристики устройств памяти построенных по схеме транзистора с плавающим затвором.

Простейшее устройство памяти представляет собой два транзистора изготовленных на одной монопленке дисульфида молибдена расположенной над двумя лентами графена, служащих как электроды стока и истока. Слой графена в несколько нанометров толщиной, отделен от канала монослоя MoS_2 шестью нанометрами туннелируемого оксида гафния HfO_2 . Многослойный графен выбран в качестве материала плавающего затвора из-за его работы выхода (4,6 эВ), которая не зависит от числа слоёв. В результате появляется глубокая потенциальная яма для хорошего захвата и удержания заряда. Кроме того, из-за низкой проводимости по вертикальному направлению удаётся избежать вредных токов в плавающем затворе. Сверху плавающий затвор покрыт 30 нм изолирующего оксида. Проводимость канала монослоя MoS_2 зависит от величины заряда на плавающем затворе и управляется напряжением, приложенным к управляющему затвору. Напряжением, приложенным к управляющему затвору, также можно менять величину хранимого заряда на плавающем затворе. Управляющий затвор (слой золота с подслоем хрома) расположен на оксиде гафния. Схема рассматриваемого устройства показана на рисунке 1 [1].

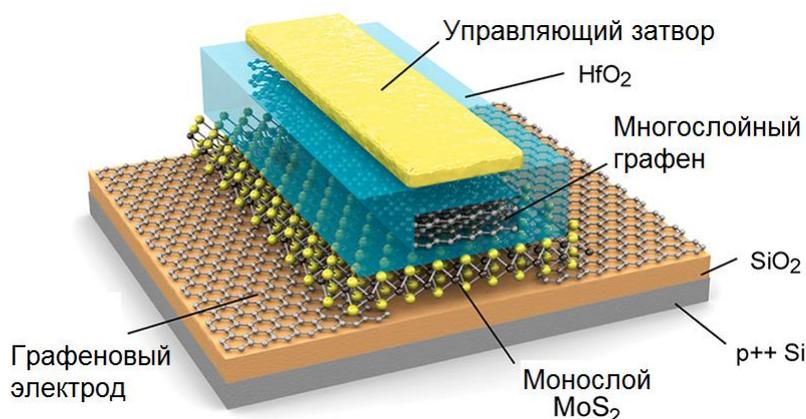


Рис. 1. Схема расположения слоёв в ячейке памяти

Процесс формирования прибора реализуется в три этапа. Во-первых, методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) выращивается слой графена и переносится на кремниевую подложку. Сверху термически выращен слой диоксида кремния (2-3 мкм толщиной). Графен разделяется на две ленты и подключается к двум металлическим проводникам. Дисульфид молибдена расщеплён на поверхность другой кремниевой подложки, покрытой полимерной плёнкой. Монослои этого материала обнаруживаются с помощью оптической микроскопии и переносятся на поверхность двух графеновых лент, образующих

электроды стока и истока после установления контакта с монослоем дисульфида. После этого поверх единичного слоя MoS_2 и графеновых лент методом атомно-слоевого осаждения (ALD) наносится слой HfO_2 толщиной в 6 нм. Метода ALD позволяет выдержать необходимую точность при получении этого изолирующего слоя. Для повышения качества слоя HfO_2 , предварительно формируется пленка диоксида алюминия Al_2O_3 . Плёнка толщиной в 1,5 нм из нескольких слоёв графена переносится на диоксид гафния так, чтобы она находилась на поверхности над плёнкой дисульфида. Плавающий затвор закрывается тем же диоксидом гафния ALD-методом. На заключительном этапе формируется управляющий затвор путем нанесения золотого проводника с подслоем хрома (толщина 50 и 10 нм соответственно). Он так же подключается к внешней электрической схеме, как и электроды. Подслой хрома необходим для повышения адгезии золота к HfO_2 . Этапы процесса показаны на рисунке 2 [1].

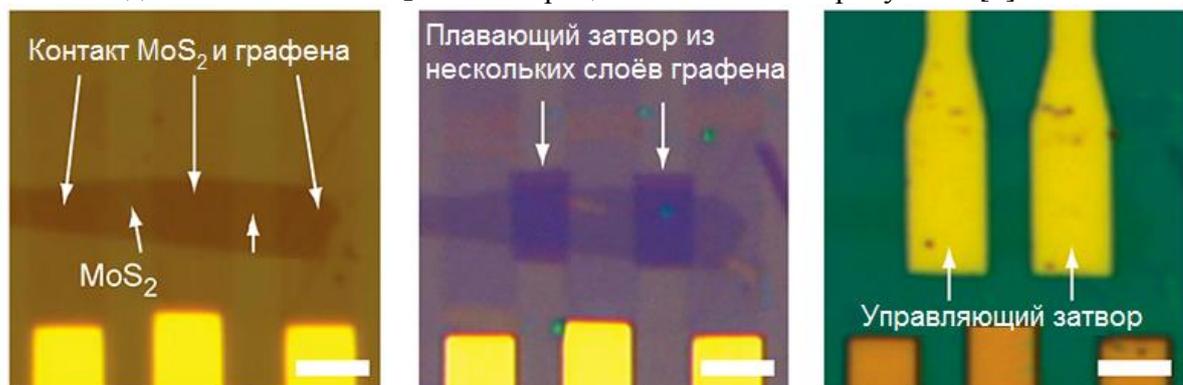


Рис.2. Изображения двух транзисторов с гетероструктурой дисульфид молибдена/графен, полученные с оптического микроскопа. Слева: до покрытия туннелируемого диоксида гафния. По центру: после нанесения многослойной плёнки из графена. Справа: готовый компонент после формирования управляющего затвора. Ширина размерных полосок – 3 мкм.

Представленное устройство работает как энергонезависимая ячейка памяти. На основе 2D структур из различных материалов возможно создание запоминающего устройства с полностью двумерной архитектурой. Такие устройства являются энергонезависимыми, размеры позволяют значительно уменьшить размеры изделий и/или повысить ёмкость их памяти. Благодаря двумерной структуре возможно создание наноэлектронных устройств на гибких подложках в связи с подходящими механическими свойствами двумерных материалов. В случае создания технологии формирования двумерных материалов для массового производства, затраты на изготовление таких наноэлектронных устройств станут экономически оправданными.

- Биосенсоры

При получении двумерного дисульфида молибдена, для обнаружения пластинок дисульфида толщиной в один или несколько молекулярных слоёв используется метод фотолюминесцентной спектроскопии. Объединенная группа ученых из австралийского университета RMIT и MIT воспользовалась фотолюминесцентными свойствами 2D MoS_2 , чтобы создать новый тип биосенсоров.

Ионы малых размеров (таких элементов, как калий и водород) имеют свойство внедряться (интеркалировать) между отдельными слоями MoS_2 . Дисульфид молибдена с внедренными в него атомами меняет свои фотолюминесцентные свойства, т.е. перестаёт в результате оптического возбуждения испускать свет.

В результате проведенных авторами исследований была выявлена следующая зависимость – при повышении концентрации молекул глюкозы вокруг биосенсора на основе MoS_2 , величина фотолюминесценции снижается.

Для множества биологических процессов ионы калия, лития и натрия имеют огромное значение. Среди таких процессов: регулирование объема жидкости в организме и работы

сердечной мышцы, управление метаболизмом, передачи нервных импульсов и т.д. Биосенсоры позволят изучить эти процессы подробнее [3].

- Секвенирование ДНК

Установление генома человека проводится с помощью секвенирования ДНК – трудоёмкого и дорого, на настоящий момент, процесса.

Секвенирование – это процесс считывания ДНК, то есть, установления последовательности четырех генов, кодированных четырьмя буквами алфавита – А, С, G и Т. При использовании монослойной пленки дисульфида молибдена возможно секвенирование молекулы ДНК путем ее прохода через нанопору, которая представляет собой малое отверстие в листе материала. Диаметр этой нанопоры выбирается таким образом, чтобы пропустить через неё молекулы ДНК и задержать частицы больших размеров.

Процесс секвенирования реализуется следующим образом: молекула ДНК проталкивается через нанопору электрическим током и при прохождении молекулы через нанопору электрический ток меняется в зависимости от формы сегмента цепочки ДНК. Регистрируя эти изменения можно воспроизвести всю нуклеотидную последовательность цепочки ДНК. Рисунок 3 иллюстрирует процесс секвенирования ДНК [4].

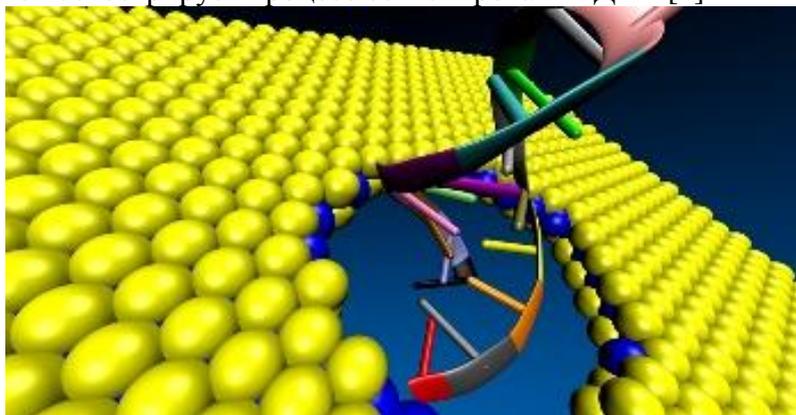


Рис. 3. Схема основной части биосенсора

Большинство материалов малоприспособны для выполнения процесса, поскольку самые тонкие пластины, которые удаётся получить, имеют толщину в несколько звеньев нуклеотидной цепи, что снижает точность определения последовательности звеньев цепи ДНК.

Исключением из такого общего для традиционных материалов недостатка является графен – он имеет толщину всего лишь в один атомный слой углерода, чего вполне достаточно для секвенирования – одновременно через нанодверствие может проходить не более одного генного основания. Но, увы, у графена есть ряд других, возможно не менее сложных проблем. Самая серьёзная из них – это прилипание к графену биополимерной молекулы. Такое взаимодействие между графеном и цепочкой ДНК вносит серьёзные шумы в колебательный процесс, что значительно затрудняет точное считывание тока.

MoS₂ в свою очередь имеет те же преимущества что и графен, но не имеет его недостатков: молекула ДНК не прилипает к дисульфиду и свободно проходит через пору.

Компьютерное моделирование секвенирования на основе MoS₂ даёт четыре различных сигнала, по числу оснований ДНК. Системы, основанные на других материалах, дают в лучшем случае два определённых результата: А/Т и С/G, – которые затем требуют сложного вычислительного анализа, чтобы отличить А от Т и С от G.

Перспективы персональной медицины связывают с определением ДНК пациента и подбором лечения в строгом соответствии с генотипом. Такой подход в сочетании с адресной терапией открывает широкие перспективы в лечении и диагностике. В скором будущем можно будет создать персональное устройство для секвенирования ДНК. Карта ДНК может помочь

предотвратить или обнаружить ряд заболеваний связанных с генами на самых ранних стадиях развития. Важным замечанием является то, что технология секвенирования и необходимое оснащение для этого с использованием дисульфида молибдена сходна с той, что используется для графена, а значит, переход на новый материал можно осуществить с относительно малыми затратами [4].

Пьезоэлектрогенератор

Пьезоэлектрический эффект широко применяется в области генерирования энергии, датчиках, акустических излучателях, точных системах механического перемещения, пьезоэлектрических двигателях и многих других.

В настоящее время теоретически описан пьезоэффект и для двумерных материалов, а последние исследования подтвердили теорию такой эффект действительно наблюдается.

Сверхтонкий дисульфида молибдена может проявлять пьезоэлектрические свойства с учётом некоторых условий:

- необходимо использовать нечётное число слоёв материала;
- деформировать лист нужно в строго определённом направлении.

Кристаллическая структура высокополярного материала позволяет появиться пьезоэлектрическому эффекту только при определённой конфигурации. Из-за высокой полярности чётное количество слоёв приводит к исчезновению пьезоэлектрического эффекта. Кроме того, необходимо, чтобы у материала отсутствовала центральная симметрия. Монослой MoS_2 обладает необходимой структурой, но у трёхмерного материала множественные слои ориентированы в случайных и зачастую противоположных направлениях и генерируют положительные и отрицательные напряжения, которые компенсируют друг друга, и дают нулевой пьезоэлектрический эффект. Эта ситуация схожа с тем, как ведут себя магнитные материалы – в изначальном состоянии все магнитные домены разориентированы поэтому суммарный вектор нулевой.

На рисунке 4 приведена схема, поясняющая пьезоэффект [5].

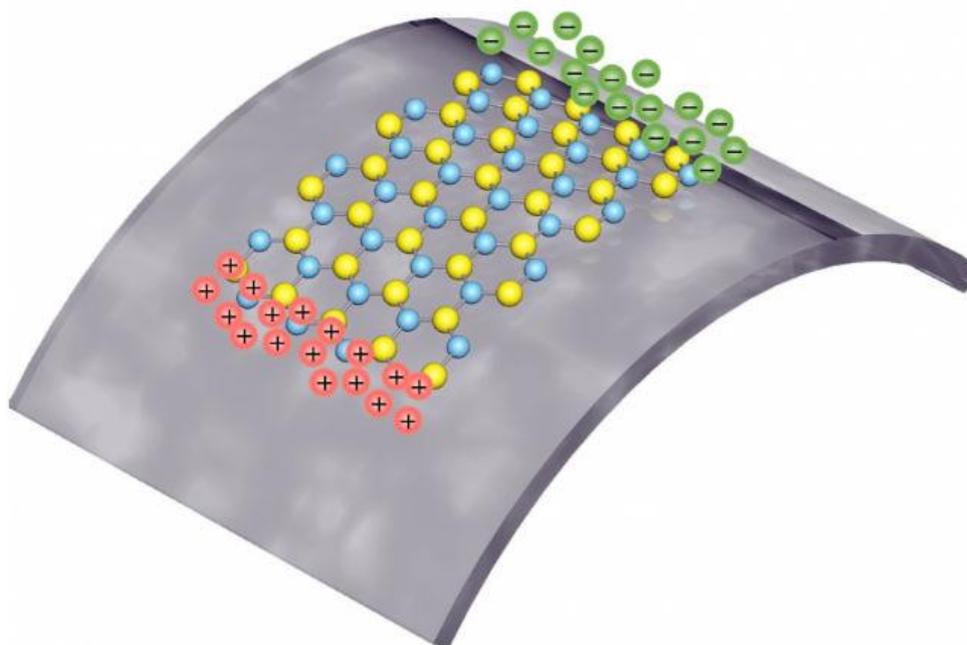


Рис. 4. Изогнутая подложка с нанесенным слоем MoS_2 : положительные и отрицательные заряды появились при растяжении слоя MoS_2

При практическом использовании пьезоэффекта в устройствах на основе тонких пленок MoS_2 , возможно создание переносных устройств, которые преобразуют энергию движения

человека или какого-либо механизма (машины) в электроэнергию питающую датчики, заряжающие батареи и т.д. Применительно к человеку это могут быть медицинские устройства, смартфоны и т.д. [5]

ВЫВОДЫ

Применение дисульфидов тугоплавких металлов в электронике открывает широкие возможности для создания более совершенных, чем современные, устройств, обладающих такими свойствами как полная или почти полная энергонезависимость, гибкость (гибкие дисплеи), и другие. Использование этих материалов в электронике окажет благоприятное влияние и на другие области науки и техники, как непосредственно, например, путем создания новых специальных устройств (биосенсоры для секвенирования), так и косвенно благодаря общему повышению уровня электроники (например, общая для всей электроники миниатюризация).

Важным при разработке нанoeлектронных устройств является тот факт, что наибольшие выгоды сулит использование дисульфидов тугоплавких металлов вместе с другими двумерными материалами, такими как графен и нитрид бора.

Наиболее серьёзным препятствием к массовому производству таких устройств является низкая воспроизводимость, а главное дороговизна методов получения двумерных материалов. Массовое производство нанoeлектронных устройств на основе 2D материалов остаётся экономически нецелесообразным. В то же время современная микроэлектроника имеет, как правило, ярко выраженный характер массового производства.

Вышеизложенное подтверждает актуальность или даже необходимость изучения двумерных материалов, и, в частности, одной из наиболее перспективных её групп – дисульфидов тугоплавких металлов. Потенциал этих материалов ещё только начал раскрываться, а проблемы связанные с их получением ещё ожидают решения.

Литература

1. *Simone Bertolazzi , Daria Krasnozhon , and Andras Kis*, Nonvolatile Memory Cells Based on MoS₂/Graphene Heterostructures ACS Nano, 2013, 7 (4), pp 3246–3252
2. *Radisavljevic, B.; Radenovic, A.; Brivio, J.; Giacometti, V.; Kis, A.* Single-Layer MoS₂ Transistors. Nat. Nanotechnol. 2011, 1. 6, 147–150.
3. *Jian Zhen Ou, Adam F. Chrimes, Yichao Wang, Shi-yang Tang, Michael S. Strano, Kourosh Kalantar-zadeh* Ion-Driven Photoluminescence Modulation of Quasi-Two-Dimensional MoS₂ Nanoflakes for Applications in Biological Systems Nano Lett., 2014, 14 (2), pp 857–863
4. *Amir Barati Farimani , Kyoungmin Min , and Narayana R. Aluru* DNA Base Detection Using a Single-Layer MoS₂ ACS Nano, 2014, 8 (8), pp 7914–7922
5. *Wenzhuo Wu, Lei Wang, Yilei Li, Fan Zhang, Long Lin, Simiao Niu, Daniel Chenet, Xian Zhang, Yufeng Hao, Tony F. Heinz, James Hone & Zhong Lin Wang* Piezoelectricity of single-atomic-layer MoS₂ for energy conversion and piezotronics Nature 514, 470–474, 23 October 2014

УДК 533.59

УМЕНЬШЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ СВЕТОФИЛЬТРОВ МЕТОДАМИ ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ

Юрий Николаевич Смирнов⁽¹⁾, Александр Сергеевич Бабурин⁽²⁾

Студент 5 курса⁽¹⁾, студент 6 курса⁽²⁾,

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.М. Моисеев

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Наблюдаемый переход от микро- к наноэлектронике подстегивается развитием оптоэлектронных устройств. Интегральная микроэлектроника заменяется интегральными устройствами по обработке оптического сигнала, вытесняющего электрический. В связи с этим актуальность пассивных элементов оптоэлектроники, к которым относятся оптические покрытия, трудно переоценить. Без них не обойтись при создании мощных полупроводниковых лазеров, систем ввода оптической информации, оптических фильтров.

Оптический фильтр (светофильтр) – это система, служащая для выделения участков спектра различной ширины из пучка некогерентного излучения. Преимуществами интерференционных фильтров из диэлектриков служат их высокая эффективность, как результат отсутствия потерь на поглощение, простота изменения области пропускания, связанная обычно с изменением оптической толщины пленок, неограниченность размеров фильтров, которые фактически определяются размерами подложки. К недостаткам интерференционных фильтров следует отнести зависимость их характеристик от угла падения света на поверхность фильтра и технологические затруднения, вызванные необходимостью нанесения большого числа слоев строго контролируемой толщины [1].

При проектировании светофильтров к подложкам применяются повышенные требования к качеству поверхности для обеспечения требуемых оптических свойств при последующем нанесении функциональных слоев. Характерные величины шероховатости данных требований составляют единицы нанометров [2]. Наиболее распространенным материалом в качестве подложек является кварцевое стекло.

Целью работы было получение стеклянных подложек, которые будут использованы для дальнейших технологических операций производства светофильтров. Ключевыми параметрами было визуальное отсутствие дефектов структуры, позволяющее получить оптические свойства на последующих этапах производства, а также шероховатость поверхности, измеряемой величиной для которой явилось значение peak-to-peak (максимальный перепад высот пиков исследуемой подложки).

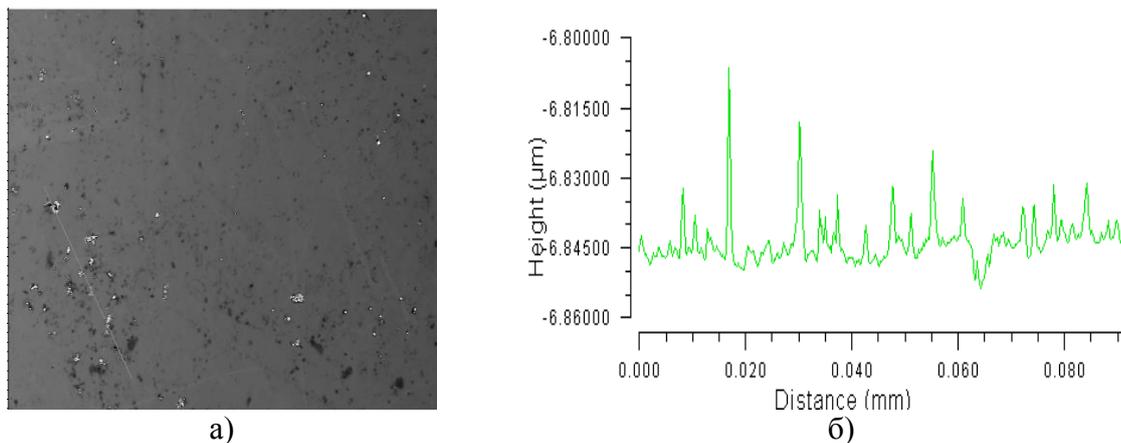


Рис. 1. Поверхность исходной стеклянной пластины:

а) внешний вид поверхности образца; б) профиль шероховатости поверхности подложки

Для отработки технологии в лабораторных условиях в качестве подложек использовалось микроскопное стекло, которое, помимо диоксида кремния, содержит 15% оксидов щелочных металлов. Исходная шероховатость подложек из-за механических загрязнений варьировалась от 13 нм до 770 нм на различной опорной длине. Для подготовки проведения исследований были испробована обработка поверхности изопропиловым спиртом, а также обработка полиритом, который представляет абразивный порошок, предназначенный для полировки широкого класса оптических стекол, линз, зеркал и др.) Содержание CeO_2 – около 99%, средний диаметр частиц – 0,6 мкм.

Обработка изопропиловым спиртом позволила удалить механические загрязнения. От использования полирита пришлось отказаться, поскольку, несмотря на значительные уменьшения шероховатости (до 7 нм), абразивная природа порошка вызывала появление царапин, что делало непригодным использование подложек, подготовленных таким образом.

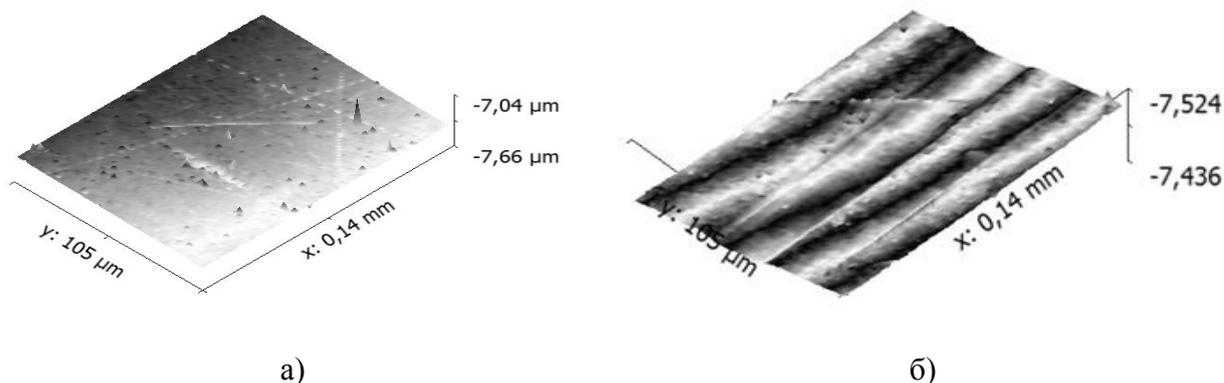


Рис. 2. Внешний вид полученных поверхностей после обработки:

а) изопропиловым спиртом; б) полиритом

Все исследования поверхностей проводились с использованием интерференционного профилометра ZYGO NewView 7300.

С целью улучшения качества поверхности стеклянных подложек была включена дополнительная операция – предварительная ионная обработка. Для оценки возможности достижения требуемых показателей был проведен анализ технических решений на базе доступных установок. В качестве сравниваемых методов выступили ионно-плазменное и ионно-лучевое травление.

Плазменно-химическая обработка была реализована на соответствующем модуле ПХО установки НаноФаб 100 в «Учебно-инженерном центре нанотехнологий, нано- и

микросистемной техники» (УИЦ НТ НМСТ) МГТУ им. Н.Э. Баумана [3]. Ионная обработка выполнялась на малогабаритной вакуумной установке МВТУ-11-1 [4].

Таблица 1. Технические характеристики профилометра ZYGO NewView 7300

№ п.п.	Параметр	Значение
1	Диапазон измерений по оси Z, нм	0,3 ÷ 150000
2	Средняя длина волны оптического излучения, нм	550
3	Скорость сканирования, мкм/сек	до 7
4	Разрешение в латеральном направлении, нм	370

Был проведен ряд экспериментов, позволивших оценить технологические возможности модуля плазмо-химической обработки. Была выдвинута гипотеза, что травление поверхностного загрязненного слоя улучшит качество поверхности, в том числе шероховатость. Первые два эксперимента были проведены с использованием больших ускоряющих напряжений. Добиться требуемых результатов не удалось, поскольку стравливание материала происходило по концентраторам напряжения вблизи оснастки, что видно на рисунках 6 (травление в течение 30 минут) и 7 (травление в течение 60 минут).

Таблица 2. Результаты эксперименты по травлению на модуле ПХО

№ эксперимента	Ускоряющее напряжение, В	Мощность, Вт	Время обработки, мин	Вытравленная глубина, нм
1	70	370	30	200
2	70	390	60	600

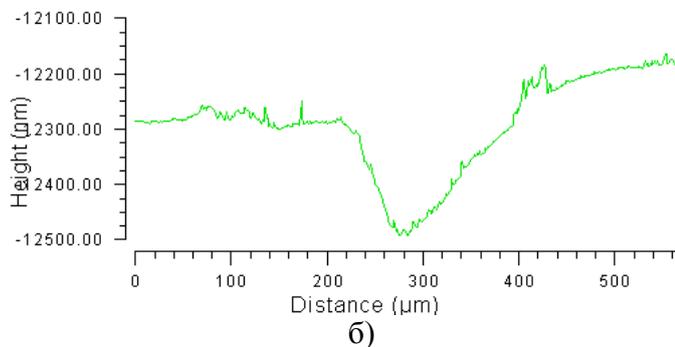
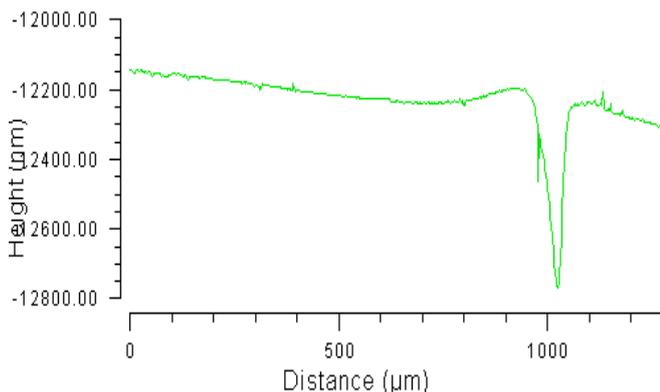
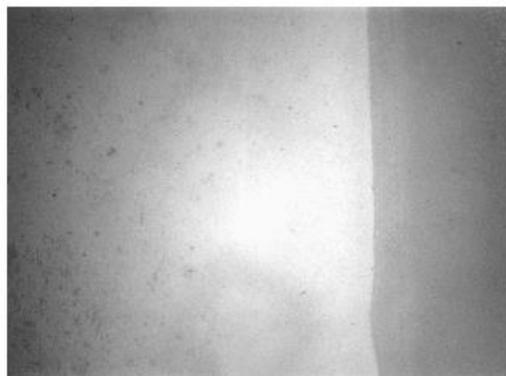


Рис. 6. Поверхность стеклянной пластины после травления в течение 30 мин:

а) внешний вид поверхности образца; б) профиль шероховатости поверхности подложки

Полученные результаты не удовлетворяли требованиям, была исследована возможность полировки с гораздо меньшими энергиями и значительно меньшей глубиной стравленного слоя. Однако после проведения эксперимента даже визуальный анализ показал, что качество поверхности ухудшилось, измерения подтвердили увеличение шероховатости (рисунок 8). Данный факт объясняется проявлением дефектов структуры стекла при прокате.



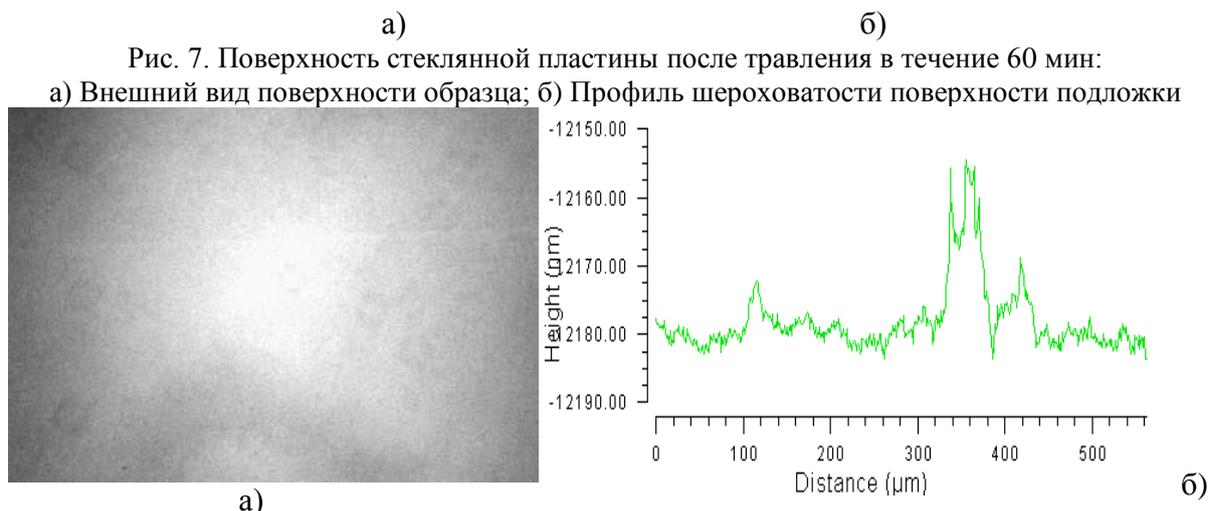


Рис. 7. Поверхность стеклянной пластины после травления в течение 60 мин:
а) Внешний вид поверхности образца; б) Профиль шероховатости поверхности подложки

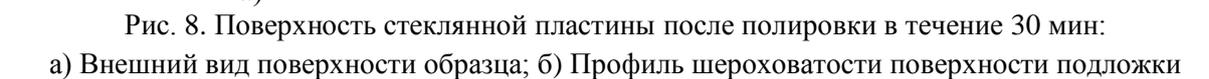


Рис. 8. Поверхность стеклянной пластины после полировки в течение 30 мин:
а) Внешний вид поверхности образца; б) Профиль шероховатости поверхности подложки

Вторым из вариантов предварительной обработки явился ионно-лучевой метод с использованием ионного источника малогабаритной вакуумной установки МВТУ-11-1. В ряде экспериментов было использовано реактивное травление с добавлением кислорода. Однако это не привело к значительному изменению результата. Более того, на поверхности проявлялись эффекты выщелачивания стекла, и такие подложки не могут быть использованы по причине несоответствия оптическим свойствам, что видно на рисунке 9,б.

Таблица 5. Результаты экспериментов по травлению на источнике ионов

№ эксперимента	Рабочий газ	Ускоряющее напряжение, кВ	Время обработки, мин	Глубина травления, нм
1	Ar	1,5	30	70 нм
2	Ar:O ₂ – 3:1	0,9	30	70
3	Ar:O ₂ – 4:1	1,5	30	230
4	Ar	2	30	155

Наиболее приемлемый результат был достигнут при ускоряющей разнице потенциалов в 2 кВ. Минимальная величина Peak-to-peak составила 4 нм. Результаты представлены на рисунке 10.

Другая серия экспериментов ионно-лучевой обработки проводилась на меньших энергиях, соответствующих полировки материала. Рабочим газом был также аргон, варьировался угол наклона подложкодержателя. Их результаты приведены в таблице 6.

Как выяснилось в результате измерений, угол наклона не оказал значительного влияния, а визуальная оценка поверхности (рисунок 11) и количественные параметры шероховатости соответствуют сформулированным требованиям.

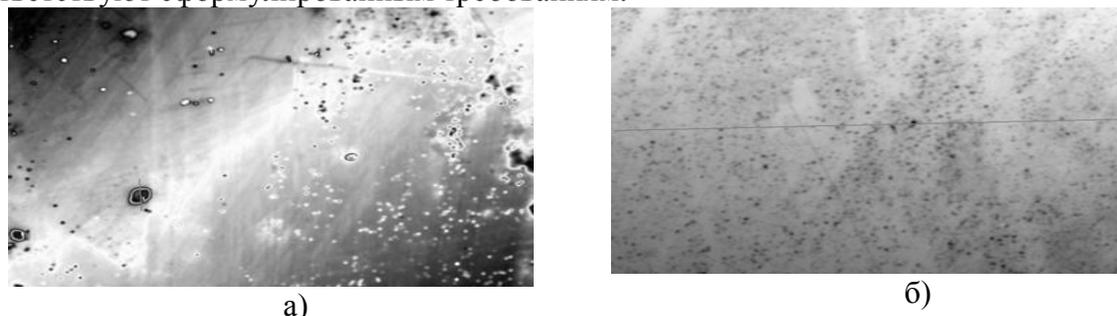


Рис. 9. Внешний вид поверхности после травления подложки в среде:
а) аргона, б) аргона и кислорода

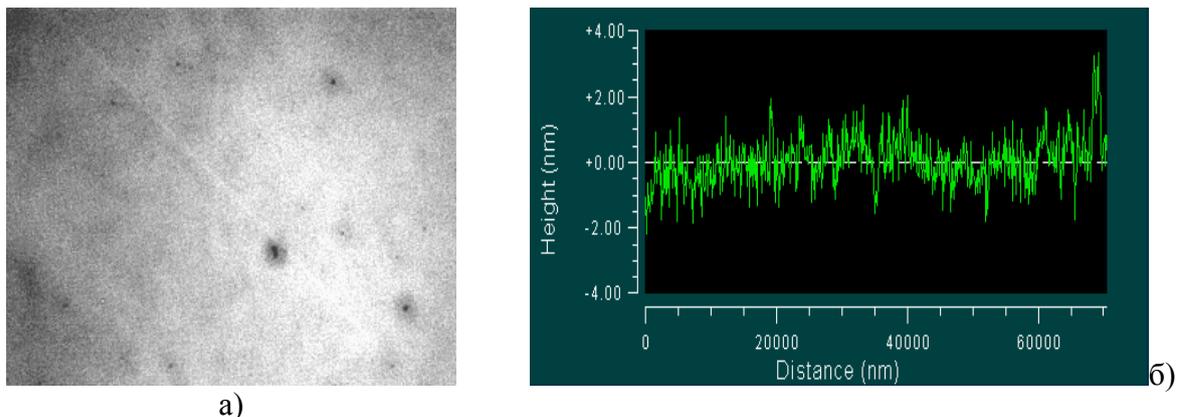


Рис. 10. Поверхность стеклянной пластины после травления с ускоряющим напряжением 2 кВ:
а) Внешний вид поверхности образца; б) Профиль шероховатости поверхности подложки

Таблица 6. Результаты экспериментов по полировке

№ эксперимента	Угол наклона подложек, град	Ускоряющее напряжение, кВ	Время обработки, мин	RtP шероховатость, нм
5	60	0,7	30	4,5
6	45	0,7	30	4,5

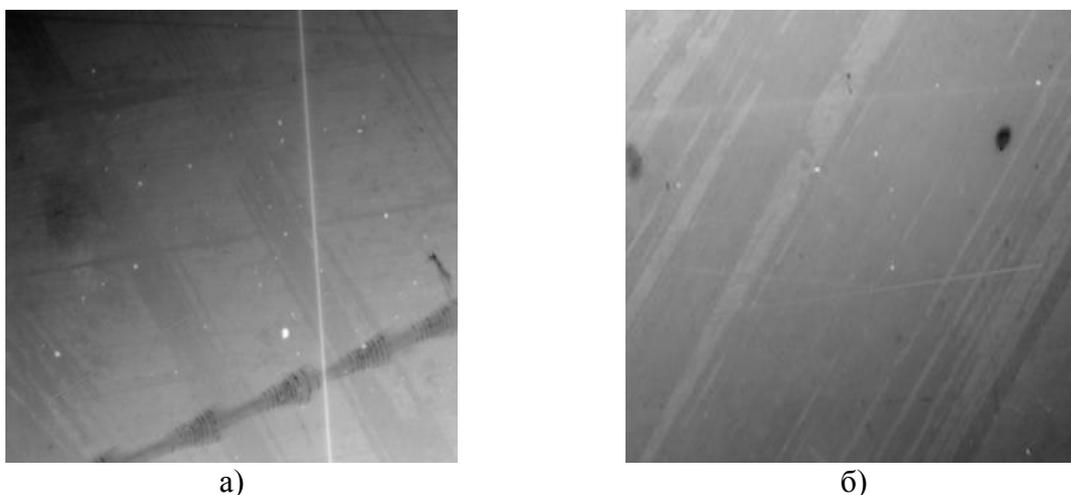


Рис. 11. Внешний вид поверхности после полировки при угле подложкодержателя в:
а) 60 градусов; б) 45 градусов

Результаты и выводы

В ходе проделанной работы были получены образцы стеклянных подложек, соответствующие технологическим требованиям, предъявляемыми при производстве светофильтров. Критериями качества являлись визуальное отсутствие дефектов структуры, а также значения шероховатости, которые оценивались параметром *peak-to-peak*. В ходе проведенных экспериментов была рассмотрена возможность использования методов ионно-плазменной и ионно-лучевой обработки для решения поставленных задач, опробованы режимы травления и полирования стеклянных подложек. Поставленная задача достижения нанометровой шероховатости при визуальном отсутствии дефектов была решена с помощью ионно-лучевой обработки более эффективно. Заявленные требования были достигнуты при травлении в среде аргона и ускоряющей мощности в 2 кВ, а также при полировке и ускоряющей мощности в 0,7 кВ при величине параметра *peak-to-peak* в 3,8 и 4,5 нм соответственно. Однако на больших энергиях происходило подпыление механической

оснастки, в то время как меньшее ускоряющее напряжение обеспечило более равномерное покрытие, значения шероховатости. Исходя из вышесказанного, именно полировка ионными лучами выглядит наиболее пригодным методом получения заданных показателей шероховатости для последующих нанесений оптических покрытий светофильтров. Дальнейшими планами после отработки технологии подготовки нанесения является подбор оптимальных режимов напыления для непосредственно получения функциональных слоев.

Литература

1. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
2. Сайт ЗАО "Опто-Технологическая Лаборатория" <http://www.optotl.ru/opt>
3. Сайт НТ-МДТ. www.ntmdt.ru/nanofab100
4. Бабурин А. С., Евлампьев А. Н. «Вакуумная малогабаритная технологическая лабораторная установка», [Электронный ресурс] // Молодежный научно-технический вестник # 01, январь 2013». – М.: ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана".

УДК 533.59

ЭЛЕКТРОЛИТЫ ДЛЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЗАПОЛНЕНИЯ 3D-МИКРОПЕРЕХОДОВ

Анастасия Александровна Тюлькова

Студент 4 курса

Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.С. Боброва

ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

В настоящее время изделия микроэлектроники развиваются в направлении уменьшения габаритов и увеличения плотности расположения элементов за счет создания многослойных структур, таких изделиях как многослойные печатные платы и многослойные коммутационные платы. Поэтому вопрос соединения и/или создания слоев металлизации становится очень важным при изготовлении этих изделий.

Рассмотрим проблему создания многослойных структур с точки зрения гальванического доразщивания переходов между уровнями металлизации. В роли таких переходов могут выступать сквозные и глухие отверстия. Такие структуры могут быть гальванически металлизированы либо частично, либо полностью. Однако при неполной металлизации структур возникают 2 проблемы:

- 1) проблема качества и надежности образовавшегося соединения,
- 2) проблема заполнения оставшейся полости таким образом, чтобы в ней не осталось пузырька воздуха и соединение слоев металлизации – заполняющий диэлектрик сохраняло целостность во всем диапазоне условий эксплуатации изделия.

Поэтому производители стремятся к полному заполнению сквозных и глухих переходов в многослойных структурах, в которых обеспечивается более надежное функционирование изделия и простота создания последующих слоев. Но и заполнение всего объема структуры связано с рядом затруднений, которые приходится решать разработчикам гальванического процесса.

К проблемам заполнения структур относятся: подбор электролитов, подбор режимов заполнения. Более подробно рассмотрим вопрос подбора электролита.

Как показывает практика, и о чем свидетельствуют результаты экспериментов по подбору электролитов, проводимые нами, электролит – раствор нескольких компонентов в дистиллированной воде, качество работы которого зависит от малых количеств добавок. Производители электролитов, описывая свой продукт, скрывают название одной или нескольких добавок, содержащихся в электролите в концентрации нескольких мг, но определяющих работу всего электролита. Таким образом, стоимость готового электролита, при изначально невысокой стоимости компонентов возрастает в несколько раз, что не может удовлетворять производителей плат. Кроме того, часто возникают ситуации, когда электролит не работает нужным образом, а именно не дает нужную заполняемость структуры, получаются осадки с плохой структурой зерен меди, медь неравномерно оседает в разных областях платы, и тому подобное. При этом очевидны 2 пути решения проблемы – либо обновлять/заменять готовый электролит, либо добавлять в него небольшие количества известных веществ в зависимости от причины возникновения недостатка. Поэтому желательно разбираться в конкретном составе используемого электролита и влияния его составляющих на результат осаждения для быстрого и дешевого выявления и устранения проблем.

Рассмотрим состав электролитов для заполнения отверстий и роль компонентов электролита в получающемся осадке. Стандартный электролит меднения для печатных плат содержит: ионы меди, ионы водорода, сульфат-ионы и ионы хлора. Электролит с таким составом получается при растворении в дистиллированной воде 5-водного сульфата меди (II) ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), серной кислоты (H_2SO_4 , 98%) и хлорида натрия (NaCl). Такой электролит называется базовым, или, в англоязычной литературе, VMS – Virgin Metal Solution or Make-Up Solution [1], поскольку он не содержит органических веществ и является основой для других электролитов, применяемых для печатных плат. Назначение этих компонентов в электролите следующее: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – источник ионов меди, осаждающихся на заготовке–катоде, H_2SO_4 – повышает электропроводность раствора, NaCl - влияет на микроструктуру, микротвердость, кристаллографическую ориентацию зерен, внутренние напряжения и внешний вид поверхности, ускоряет восстановление ионов Cu^{2+} до Cu^+ . Влияние базовых компонентов электролита на внешний вид осадка меди представлено на рисунках 1-3, на которых изображены поверхности двухстороннего фольгированного стеклотекстолита после гальванического осаждения меди в течение 5 мин при плотности тока 1 А/дм^2 и перемешиванием электролита с помощью барботажа.



Рис. 1. Заготовка после гальванического осаждения. Состав электролита: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 200 г/л



Рис. 2. Заготовка после гальванического осаждения. Состав электролита: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 200 г/л, H_2SO_4 – 50 г/л



Рис. 3. Заготовка после гальванического осаждения. Состав электролита: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 200 г/л, H_2SO_4 – 50 г/л, NaCl – 50 мг/л

Как видно из рисунков, для равномерного осаждения меди недостаточно только наличия неорганических компонентов в электролите.

На рисунках мы видим, что:

- 1) при добавлении компонентов к электролиту меняется цвет осадка – от бурого к розовому;
- 2) повышается равномерность распределения осадка.

Однако поверхность меди не является блестящей и равномерность осадка не одинакова по всей площади. Причем нужно учитывать, что площадь образцов ($0,25 \text{ дм}^2$) была существенно меньше площади анода ($1,7 \text{ дм}^2$), а при условии, что площадь заготовки может быть равна или больше площади анода, неравномерность осадка может стать еще больше.

Поэтому для того, чтобы обеспечить равномерное распределение тока в электролите, а, соответственно, и по заготовке, производители стали добавлять в состав электролита различные добавки, представляющие собой органические вещества. Также эти добавки могут выполнять следующие функции: подавлять дендритообразование, уменьшить размер зерен осадка, получать блестящие осадки непосредственно при осаждении, увеличить рассеивающую или кроющую способность электролита, активировать растворение анода [2].

В книгах 50х - 90х годов, посвященных гальванике [3, 4, 5], в качестве блескообразующих добавок можно встретить следующие вещества: этиловый спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, блескообразователи «ЛТИ», Б-11-72, БС-1, БС-2, «Меданит», «Новостар», «Юбак». Роль добавок заключается в повышении рассеивающей способности используемых кислых электролитов, которая, что важно заметить, мала по сравнению с цианистыми электролитами, а также в уменьшении размеров зерен осадка. Отмечается, что эти добавки способствуют металлизации отверстий с отношением глубины к диаметру, или aspect ratio в англоязычной литературе, не более 2,5. Варианты составов электролитов с перечисленными добавками представлены в таблице 1.

Таблица 1. Электролиты для печатных плат

Вещество	Состав 1	Состав 2	Состав 3
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, г/л	150-250	200-240	60-80
H_2SO_4 , г/л	50-70	40-60	150-160
NaCl , г/л		0,03-0,06	0,03-0,06
Спирт этиловый, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, мл/л	5-10	-	-
ЛТИ, г/л	-	-	1-2
Б-72-11, либо БС-1, мл/л	-	3-5	-

Как видно из таблицы 1, дополнительные вещества добавляются в электролит в очень малых количествах, но и в такой концентрации они успешно выполняют свое предназначение. Заметим, что большинство блескообразователей было специально разработано для гальванического меднения печатных плат и широко известны лишь их названия, не отражающие состав и принцип работы в электролите. Также в рассмотренной литературе не указаны размеры элементов структуры, т.е. диаметры отверстий, которые можно покрыть представленными составами, вероятно, потому, что в 50-е – 90-е годы 20-го века преимущественно использовалась металлизация стенок переходных отверстий, а не их заполнение.

В 1997 году компания IBM сообщила о создании полностью интегрированных устройств с межсоединениями из меди, преимуществом которых было снижение сопротивления медных проводов на 40-45% и существенное улучшение сопротивлению электромиграции [1]. Также ими был использован процесс dual damascene, подразумевающий одновременное создание переходных соединений между 2-мя уровнями металлизации и 2го уровня проводников в диэлектрике. Этот процесс уменьшает количество этапов по изготовлению многослойных структур на 30%, что снижает затраты на изготовление плат [1]. В связи с изобретением такой технологии возникла необходимость беспустотного заполнения, суперконформного или суперзаполнения, superconformal filling или «superfilling» в англоязычной литературе, структур в слое диэлектрика, что привело к созданию электролитов с набором органических добавок, выполняющих определенные функции в рамках гальванического процесса. Как отмечается в различных источниках, технология суперзаполнения отверстий приемлема для гальванической металлизации отверстий с диаметрами от 1 до 150 мкм и глубиной от 5 до 450 мкм.

Добавки для беспустотного осаждения меди широко описаны во многих зарубежных (Германия, США, Китай), так и отечественных, литературных источниках – книгах, статьях, патентах. Органические компоненты электролита в зависимости от их роли можно разделить на 3 группы – подавитель, ускоритель, выравниватель.

Подавитель – вещество с большим молекулярным весом (например, полиэтиленгликоль (PEG)) – уменьшает скорость осаждения ионов меди, особенно при наличии в электролите ионов хлора, поскольку сам полиэтиленгликоль является слабым ингибитором. Это соединение адсорбируется на поверхности подложки и образует полимерный адсорбированный PEG-Cl слой. Этот слой также содержит ионы меди [6]. Из-за большого размера и малой диффузии мала вероятность того, что молекулы подавителя достигнут дна глухого микроотверстия. Это приводит к меньшему содержанию подавителя на дне полости. Наибольший подавляющий эффект получается на поверхности подложки, помогая снизить перегрузки и уменьшить вероятность образования полостей в микропереходах [7]. Это вещество не входит в состав получаемого осадка и его концентрация в электролите остается практически постоянной [1].

Ускоритель – органические серосодержащие соединения (например, SPS, MPSA (3-меркапто-пропан-сульфонат)) - адсорбируется на дне полости, активно при наличии в электролите ионов хлора. При электроосаждении меди распадается дисульфидная связь. Ионы меди и SPS образуют адсорбированные частицы, образованный комплекс стабилизирует ионы

одновалентной меди. Поскольку восстановление Cu^{2+} до Cu^+ является лимитирующей стадией электроосаждения меди, стабилизация ионов одновалентной меди приводит к увеличению их количества у поверхности меди, что приводит к повышению скорости осаждения. Другая модель каталитического эффекта - замещение SPS PEG-Cl, который замедляет осаждение, и эта конкурентная адсорбция приводит к увеличению скорости осаждения [6]. Способствует появлению зародышей для пленки с мелкозернистой структурой [7]. Ускоритель расходуется в процессе осаждения меди, так как его молекулы частично входят в состав осажденной меди [1].

Выравниватель - молекулы полимера с большим весом, содержащие функциональные группы аминов ($-\text{NH}_3$) или амидов ($-\text{NH}_2$) (например, соединения тиомочевины, полиэтиленмин и т.д.) - уменьшает шероховатость поверхности. Его блокирующий эффект локализован. Значительно сокращает осаждение меди на высоких местах, способствуя выравниванию образуемого слоя [8].

Несмотря на то, что известно много веществ, используемых в качестве органических добавок для электролитов, есть мало сведений про непосредственный механизм действия этих добавок, и все еще ведутся работы по подбору веществ, которые могут лучше исполнять ту или иную функцию в электролите. В качестве примера приведем патент российской компании БАСФ [6], которая разработала новую композицию, используемую в качестве выравнивателя.

Концентрации этих добавок, описываемые в литературе, находятся в довольно широких пределах: подавитель – от 5 до 5000 мг/л, ускоритель – от 0,05 до 200 мг/л, выравниватель – от 0,1 до 500 мг/л. Очевиден вопрос: в каких концентрациях и в каких пропорциях эти добавки должны присутствовать в электролите для отверстий определенного типа с определенными размерами? Учтем, что рекомендуемые концентрации неорганических компонентов электролита также находятся в широких диапазонах: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – от 20 до 250 г/л, H_2SO_4 – от 10 до 350 г/л, NaCl – от 30 до 120 мг/л.

Зарубежные производители электролитов и технологий металлизации (например, J-Kem international, Mega Electronics, Atotech) предлагают либо готовые электролиты с засекреченным составом органических добавок, либо непосредственно добавки в виде растворов с неизвестным составом, либо поставку и наладку технологии с использованием растворов с известным назначением, но неизвестным составом. Во всех описанных случаях очевидна проблема зависимости производства от конкретного поставщика электролита/добавки для электролита, сложности при выявлении причин возможных неполадок при работе электролита, зависимость стоимости производства от курса рубля к другим валютам.

Отметим, что неорганические компоненты для приготовления электролитов производятся в России и стоят относительно недорого, тогда как органические компоненты, а именно для процесса суперзаполнения отверстий, производятся зарубежом (производителями являются Германия, Китай). Однако, из-за того, что концентрации органических компонентов малы, стоимость органических добавок, приходящихся на 1 л электролита, оказывается малой по сравнению со стоимостью неорганических компонентов. Примерный расчет стоимости компонентов электролита для заполнения глухих отверстий представлен в таблице 2.

Таблица 2. Состав и цены компонентов электролита

Вещество	Цена, руб/кг или руб/л	Максимальное содержание в электролите	Стоимость на 1 л электролита, руб
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ч	300	250 г/л	75
H_2SO_4 (98%) ч	220	350 г/л (644 мл/л)	141,68
NaCl хч	60	120 мг/л	0,01
Подавитель - Полиэтиленгликоль 1500	735	5 г/л	3,7
Ускоритель - MPS	4500	200 мг/л	36

Стоимость компонентов электролита: $75+141,68+0,01+3,7+36=256,39$ руб

Компоненты нужно растворять в дистиллированной воде, стоимость которой находится в пределах от 10 до 30 руб/л, поэтому итоговая стоимость электролита составляет от 266,39 руб/л до 286,39 руб/л. Как видно, стоимость неорганических компонентов российского производства намного больше стоимости органических компонентов зарубежного производства (237 руб против 40 руб).

Очевидно, что электролит для металлизации отверстий можно составить на основе известных компонентов, большая часть которых производится в России. Поэтому мы стали заниматься детальным изучением влияния различных компонентов электролита на его способность к заполнению глухих и сквозных отверстий, изготовленных в печатных платах (стеклотекстолите) и многослойных коммутационных платах (слоях фоточувствительных полимеров).

Возникли следующие вопросы, ответы на которые предполагается найти в ходе исследований в лаборатории 400юа кафедры МТ11:

- 1) можно ли с помощью «новых» электролитов, содержащих подавитель, ускоритель и выравниватель, заполнять отверстия с диаметрами больше заявленных 100-150 мкм и сколько это будет занимать по времени;
- 2) можно ли с помощью «старых» электролитов успешно заполнять отверстия с диаметрами 100 мкм и менее и отношением глубины к диаметру более 2,5;
- 3) какого качества заполнения сквозных отверстий с помощью различных электролитов.

В ходе исследований будет рассматриваться способность заполнения электролитами различного состава следующих структур: глухие отверстия разного диаметра и глубины в стеклотекстолите и фоточувствительном полимере SU8, сквозные отверстия в стеклотекстолите, «траншеи» в стеклотекстолите и фоточувствительном полимере SU8. Примеры тестовых структур представлены на рисунках 4-6.



Рис. 4. Заготовка с гальванически металлизированными сквозными отверстиями



Рис. 5. Заготовка с гальванически металлизированными «траншеями» в стеклотекстолите

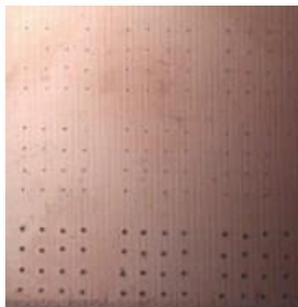


Рис. 6. Заготовка с глухими отверстиями в стеклотекстолите

Кроме того, планируется выявление влияние способа предварительной металлизации (прямая металлизация диэлектриков, зародышевый слой меди, полученный напылением) на качество гальванической металлизации в электролитах с различным составом.

Общий подход к проведению экспериментов следующий: выбирается заготовка определенного типа, изготавливается электролит с известным составом всех компонентов, выбирается режим проведения осаждения меди. Затем проводится 5-7 циклов осаждения при изменении (в зависимости от изучаемого параметра):

- 1) концентрации какого-либо компонента электролита,
- 2) режима осаждения (времени, плотности тока, наличия/отсутствия перемешивания),
- 3) вида заготовки,
- 4) вида предварительной металлизации.

После этого проводится изготовление микрошлифов и измерение толщины металлизации на стенках и дне структуры, на поверхности подложки. Также фиксируются такие данные как цвет осадка, равномерность осадка по площади заготовки, заполняемость структур в разных частях заготовки.

Заключение

Таким образом, тема подбора электролитов для гальванического заполнения глухих и сквозных отверстий является актуальной, в соответствии с современным уровнем развития технологий производства многослойных печатных и коммутационных плат и потребностью переходить от зарубежных реактивов и процессов к отечественным. В результате работ, проводившихся в лаборатории, был подобран состав электролита, подходящего для прямой металлизации печатных плат с глухими отверстиями, характеризуемые соотношением глубины отверстий к их диаметру, равному 5:1. Состав электролита: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 200 г/л, H_2SO_4 – 150 г/л, NaCl – 100 мг/л, Полиэтиленгликоль 1500 – 250 мг/л.

Литература

1. Zhi, Charlie Chunxing, "Effect of thiols and their aging on Cu electrodeposition for ULSI interconnects" (2002). *Scholar Archive*.
2. Ю.Д. Гамбург. Гальванические покрытия. Справочник по применению/– М.: Техносфера, 2006 – 216с
3. Н.Ф. Мелашенко . «Гальванические покрытия диэлектриков» Справочник/ - Минск: Беларусь, 1987 – 176с.
4. В.А. Ильин. Технология изготовления печатных плат/– Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1984 – 77с.
5. Л.Г. Зальцман, С.М. Черная. Спутник гальваника/– 3е изд., доп. – К.: Техника – 1989. – 191с.
6. Dr. A. Uhlig *Electroplating aspects in 3D IC Technology* [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.sematech.org/meetings/archives/3d/8510/pres/Atotech.pdf> - Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 17.03.2015)
7. *Taran Gupta. Copper interconnect technology* / - Springer Science+Business Media, LLC 2009

8. Патент RU 2 529 607 С2 от 27.09.2014 «Композиция для нанесения металлического покрытия, содержащая подавляющий агент, для беспустотного заполнения субмикронных элементов»

УДК 621.3.049.75, 621.3.049.76

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ

Вячеслав Валериевич Хриченко

студент 3 курса

Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель Ю.С. Боброва

ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Аннотация

Последние пять лет в России активно ведутся исследования и разработки в области изготовления высокоплотных 3D-микросистем, основу которых составляют многослойные коммутационные платы (далее – МКП). В данной статье приводится обзор технологий для изготовления МКП, как для изделий гражданского, так и для изделий специального назначения. Предлагается перспективная высокопроизводительная технология МКП на основе пленочных полимеров, среди которых выбран наиболее технологичный материал с требуемыми диэлектрическими характеристиками.

Ознакомление с печатными платами. Печатные платы в современном мире.

Под печатной платой понимается конструкция электрических межсоединений на изоляционном основании [1].

В свое время Переход к печатным платам ознаменовал качественный скачок в области конструирования радиоэлектронной аппаратуры. Печатная плата совмещает функции носителя радиоэлементов и электрического соединения этих элементов.

Подлинным "отцом печатных плат" считается австрийский инженер Пауль Эйслер. Технологии массового производства печатных плат оказались востребованными уже во время второй мировой войны. А с середины 50-х годов началось становление печатных плат, как конструктивной основы радиоаппаратуры не только военного, но и бытового назначения.

Печатная плата стала основным конструктивным элементом современной радиоэлектронной аппаратуры.

Роль многослойных печатных плат (далее – МПП) в будущем электронной техники

Главная тенденция развития современной электронной техники – стремление к микроминиатюризации и повышению функциональности ее компонентов [2]. Постоянное совершенствование изделий микроэлектроники и рост степени интеграции микросхем сопровождаются постоянным ростом плотности расположения элементной базы. Плотность монтажа электронных устройств растет примерно на 8% в год, что позволяет уменьшать физические размеры аппаратуры на 20% в год [3]. Увеличение плотности расположения элементной базы требует того же самого от проводников печатной платы – носителя этой элементной базы. В связи с этим возникает множество задач, которые необходимо решать. Так, наиболее действенным методом увеличения плотности монтажа был признан переход к размещению элементов в объеме платы и создание многослойных структур, позволяющих

уменьшить размеры платы в разы, без потери, а то и с увеличением за счет сокращения расстояний между элементами, быстродействия.

Очевидно, что многослойные платы на данный момент являются наиболее перспективной отраслью производства коммутационных плат.



Рис. 1. Классическая технология производства МПП

Классическая технология производства МПП

Не смотря на все большую распространенность МПП среди российских изготовителей электронной техники, спросом пользуются наиболее простые из них – четырехслойные со сквозными отверстиями. По различным источникам, их доля составляет около 60% от общего количества производимых МПП [4]. Такие платы создаются на базе сравнительно недорогого материала FR4 (таблица 2) и не обладают высокой плотностью монтажа, что говорит о низком быстродействии при габаритах, превышающих габариты МКП, изготовленных более современными методами.

В ознакомительных целях, классическая технология производства МПП приведена на рис.1.

Технология «ПРИМА»

Так как классический метод изготовления МПП, ввиду низкой плотности коммутации и сложности обеспечения теплоотвода от активных элементов, не соответствует современным международным стандартам, была создана технология «ПРИМА», позволяющая изготавливать платы с плотностью монтажа превышающей плотность классических МПП в 2-2.5 раза.

В настоящее время в наше время идет активная разработка производств на базе этой технологии. «ПРИМА» была разработана еще в советские годы, но в связи с кризисом 90х годов, была оставлена без внимания вплоть до 2008 года [5].

Сами создатели технологии А.Слонимский, Р.Тахаутдинов, А.Девитайкин описывают ее следующим образом: на обе поверхности металлической пластины (в которой при необходимости формируют сквозные отверстия) поочередно на каждую сторону наносят слой конструкционного фоточувствительного полимера (Эповин, Su-8, Cyclotone 4000), обладающего фоторезистивными свойствами. Компаунд покрывает при этом стенки отверстий.

После полимеризации компаунда соответствующую поверхность шлифуют, чтобы обеспечить необходимую плоскостность.

Затем на одной из поверхностей методом фотолитографии формируют копировально-изоляционный рельеф (далее – КИР), так что рисунок, образованный впадинами рельефа, соответствует будущему проводящему рисунку.

Всю поверхность КИР, в том числе выступы и впадины, подвергают меднению (т.е. покрытию медной пленкой) сначала – плазменно-дуговым или магнетронным способом, а затем – гальваническим до заданной толщины. После этого медь, нанесенную на выступающие части КИР, удаляют машинным плоским шлифованием, не затрагивая при этом медь, оставшуюся в канавках и образующую проводящий рисунок слоя.

Следует отметить, что получение проводящего рисунка без применения припоев, без травления и, соответственно, без подтравливания проводников, а также исключение возможного зарастивания узких промежутков между проводниками (когда медь и припой гальванически наращивают по рисунку), которое возникает при осаждении меди на всю поверхность, позволяют уменьшить ширину проводников до 0,05 мм, а ширину зазоров – до 0,1 мм. Поэтому разрешение процесса будет определяться только разрешением фоторезиста.

Таким образом формируется проводящий рисунок первого слоя. Далее аналогичным способом получают второй слой, содержащий в качестве проводящего рисунка столбики, которые служат для межсоединения проводящих рисунков смежных слоев, и, наконец, тем же способом формируют проводящий рисунок третьего слоя, который с помощью столбиков второго слоя соединяется с проводниками первого слоя. При необходимости таким способом можно получить проводящие рисунки в следующих слоях, а также слой защитной маски.

Все операции выполняются на групповых заготовках.

Подобный метод изготовления электроники удобен и технологичен, когда идет речь о производстве изделий специального назначения, выпускаемых поштучно или мелкими сериями.

В то время, как во всем мире около 92% электроники идет на нужды массового рынка: товары широкого потребления, телекоммуникации и автомобильная промышленность, лишь 6-8% электроники производится в рамках специальной промышленности. Таким образом, производство изделий массового назначения является приоритетной отраслью коммутационных плат.

В России же распределение электроники по сферам применения несколько другое: 20-25% производств единичных и малосерийных занимается изготовлением изделий специального назначения.

«ПРИМА» в представленном на данный момент виде, не способна заменить собой традиционную технологию изготовления МПП и удовлетворить потребности серийного и массового производства изделий гражданского назначения.

Ощущается острая нехватка отечественных изделий широкого потребления. Необходимо разработать технологию, способную удовлетворить потребности массового рынка при минимальных затратах на её реализацию.

Технология производства многослойных коммутационных плат, на основе наполненных минералами полукристаллических пленочных полимеров

Предлагается доработать вышеупомянутую технологию, поставив в ее основу конвейерное производство, где, в качестве самой ленты конвейера выступает диэлектрическое основание платы. Очевидно, что материал основания, претерпевающий деформации, перекачиваясь через ролики, должен обладать большей гибкостью и пластичностью, чем FR4 и AlN – материалы основания, широко распространенные в производствах по классической технологии и технологии «ПРИМА» соответственно. Немаловажным преимуществом предлагаемой технологии (рис.2) является отсутствие необходимости разработки новых материалов. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат обеспечено большой номенклатурой материалов, обладающих необходимыми механическими и технологическими

свойствами. Среди них можно выделить гибкие полиимидные пленки и пленки ARTIV PEEK, изготовленные из полимера Victrex PEEK.

Таблица 1. Основные технологические характеристики приоритетных материалов оснований

Материал	Тангенс угла потерь	Коэффициент линейного теплового расширения, $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Полиимид ПМ-1	0,0025 - 0,003	20 — 30
Пленка ARTIV PEEK1000 (ненаполненная)	0.002	47
Пленка ARTIV PEEK 1100(наполненная минералами)	0.001	35

Проведя сравнительную характеристику, можно выделить наполненные минералами полукристаллические пленки ARTIV PEEK 1100, изготовленные из полимера Victrex PEEK как наиболее подходящей в нашем случае материал основания.

Таблица 2. Стоимость производства 1 кв. дм МКП каждым из перспективных методов

Метод	Классический МПП 7 класс точности		«ПРИМА»		Конвейерный	
	Название	Примерная стоимость, \$/кв.дм	Название	Примерная стоимость, \$/кв.дм	Название	Примерная стоимость, \$/кв.дм
Материал основания	FR4	0,5	AIN	30	ARTIV PEEK 1100	5.8
Материал соединения/ диэлектрический слой	Препрег (соединительная стеклоткань)	0,03	Su-8, MicroChem, Германия	10	-	0
Процесс соединения слоев	Прессование	Цена n	Фотолитография	Цена m; m>n	Прессование	Цена n
Итого		0,53+n		40+m		5.8+n

Из таблицы 2 видно, что наименьшая себестоимость платы на единицу площади наблюдается у изделий, выполненных классическим методом изготовления МПП. Тем не менее, классическая технология не позволяет производить платы с плотностью упаковки, продиктованной стандартами современного рынка электроники. В то же время, стоимость ARTIV PEEK 1100 на единицу площади заметно ниже стоимости оснований, полученных технологией «ПРИМА», что, при прочих равных показателях, является значимым достоинством в условиях массового производства.

Технологический процесс изготовления коммутационной платы предлагается полностью автоматизировать, в связи с чем был разработан следующий ряд операций (рис.2)

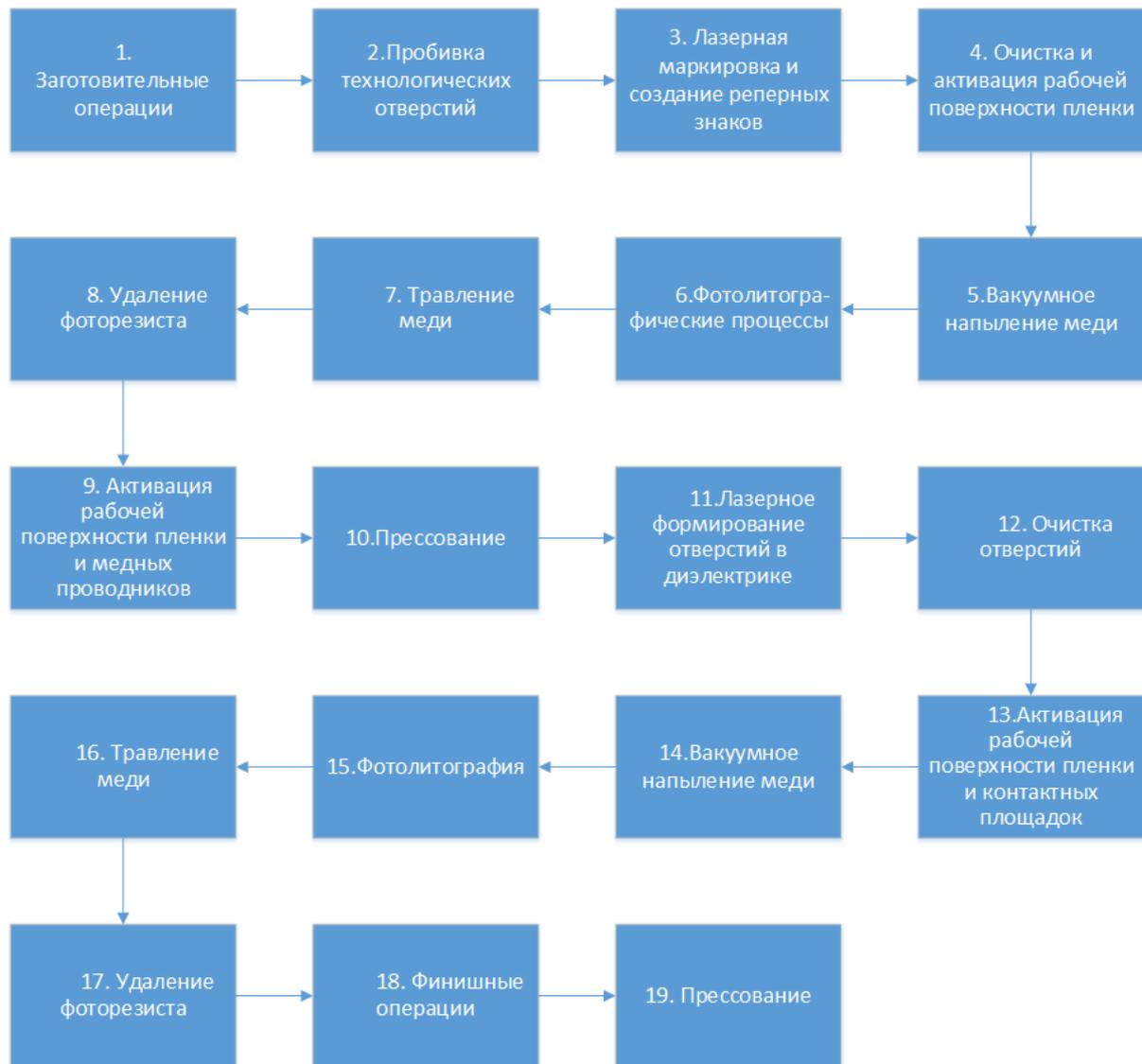


Рис. 2. Технология производства многослойных коммутационных плат, на основе наполненных минералами полукристаллических пленочных полимеров

Безусловно, в связи со спецификой метода, возникает целый ряд вопросов по реализации технологии в реальном производстве. Один из таких вопросов задает тот факт, что при выполнении некоторых технологических операций, часть движущейся ленты требуется поместить в вакуум. Так, в ходе изысканий было принято решение об установке многокамерных вакуумных установок шлюзового типа, действующих без разгерметизации. Подобные установки широко используются при нанесении покрытий на длинномерные стекла.

«Мышление должно уметь видеть одно в другом». Эрнст Симон Блох

Ввиду того, что представленная технология базируется на уже разработанных материалах и находит решения подавляющего большинства технологических вопросов в уже существующих областях промышленности, ее дальнейшая разработка и ввод в эксплуатацию не требует значительных затрат. Сам же метод является возможностью производить МКП, соответствующие современным требованиям, между тем, способные удовлетворить потребности серийного и массового производства изделий гражданского назначения, обеспечивая значительно меньшую (табл.2) себестоимость изделий, в сравнении с наиболее перспективной на данный момент технологией «ПРИМА».

Литература

1. *Медведев А.М.* «Печатные платы. Конструкции и материалы», 2005.
2. *В. Уразаев.* «Печатные платы - линии развития»,
3. *Медведев А.М. Семенов.* «Концепция развития российского производства печатных плат», 2010
4. *Р.Тахаутдинов.* «Многослойные печатные платы. Первые шаги в освоении операции прессования», 2010
5. *А.Слонимский, Р.Тахаутдинов, А.Девитайкин.* «Безотходная технология производства печатных плат», 2008.

Секция XII

Лазерные технологии в машиностроении

Председатель:

Григорьянц Александр Григорьевич

доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Лазерные технологии в машиностроении»
(МТ-12), МГТУ им. Н. Э. Баумана

Ученый секретарь:

Богданов Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные
технологии в машиностроении» (МТ-12) МГТУ им.
Н.Э.Баумана

УДК 621.375.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НАНЕСЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Роман Дмитриевич Асютин

*Студент 5 курса**кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: А.Я. Ставертий**ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»*

Существует технология лазерной наплавки, она заключается в послойном локальном расплавлении порошков и их сплавлении с поверхностью обрабатываемого металла, в связи с этим, погонные мощности процесса ниже, чем при применении дуговых и плазменных методов, соответственно, тепловое воздействие на подложку минимально [1]. Это позволяет использовать лазерную наплавку для большого количества разнообразных деталей.

Для лазерной наплавки существует ряд входных параметров, таких как мощность излучения, подача порошкового материала и скорость процесса. Все эти параметры в сумме влияют на ширину валика (B), высоту наплавленного слоя (H), глубину подплавления подложки (h) и на угол α у основания валика (α), как представлено на рисунке 1. Один из основных параметров для оценки функциональных свойств наносимого слоя – коэффициент перемешивания (D).

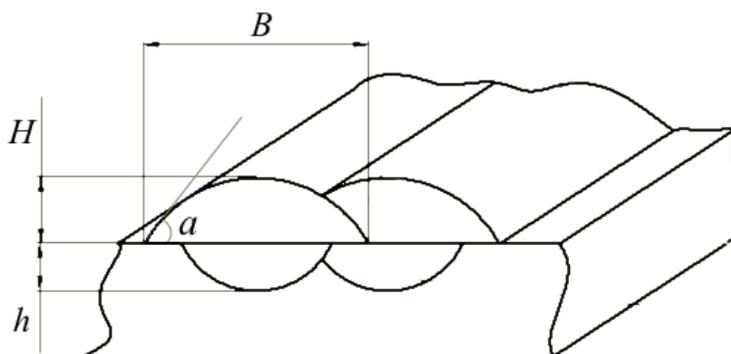


Рис. 1. Основные геометрические параметры валика

Качество лазерной наплавки зависит от большого количества физико-химических явлений и технологических факторов. В таблице 1 приведены параметры, участвующие в этом процессе.

Таблица 1. Входные и выходные параметры и процессы, участвующие в технологическом процессе [2]

Входные параметры		Процессы	Выходные параметры		
Лазер	Средняя мощность		Физические явления	Качества покрытия	Геометрия
	Размер пятна	Микроструктура			
	Длина волны	Твердость			
	Режим импульсный или	Трещинообразование			
	Распределение энергии в	Динамика ванны подплавления			Остаточные напряжения
		Взаимодействие расплав/газ			Шероховатость поверхности
Форма импульса излучения	Переотражение лазерного излучения порошком	Перемешивание			
Система	Быстрая кристаллизация				
	Скорость				
	Ускорение				
	Точность				
Прочее	Грузоподъемность				
	Предварительный нагрев				
	Расход защитного газа				
Материал	Тип защитного газа				
	Геометрия подложки				
	Химический состав				
Подача порошка	Металлургические, теплофизические и оптические свойства				
	Расход порошкового материала				
	Тип и расход инертного газа				
	Пространственное распределение потока порошка				
Геометрия сопла					

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что плотность мощности излучения влияет на коэффициент перемешивания не меньше, чем, к примеру, мощность. Изменяя мощность лазерного излучения (входные параметры) мы изменяем плотность мощности, и, тем самым, коэффициент перемешивания.

Известно, что изменение химического состава наплавленного металла часто ведет к резкому изменению его свойств. [3]. В связи с этим, сохранение минимального коэффициента перемешивания необходимо для получения свойств наплавленного покрытия максимально близких к свойствам наплавленного материала.

В данной работе проводились исследования технологии газопорошковой наплавки износостойких покрытий на основе никелевых сплавов на подложки из стали. В качестве

материала покрытий использовались порошковые материалы на основе никеля. Химический состав порошков представлен в таблице 2.

Таблица 2. Никелевые порошки, массовая доля %

Тип порошка	Si	Fe	B	O ₂	C	Ni		Твердость
ПГСР-2	2,93	0,26	2,89	0,01	-	93,9		49 HRC
ПГСР-3	4,42	3,65	3,23	0,029	0,69	Ni	Cr	63 HRC
						73,9	14	

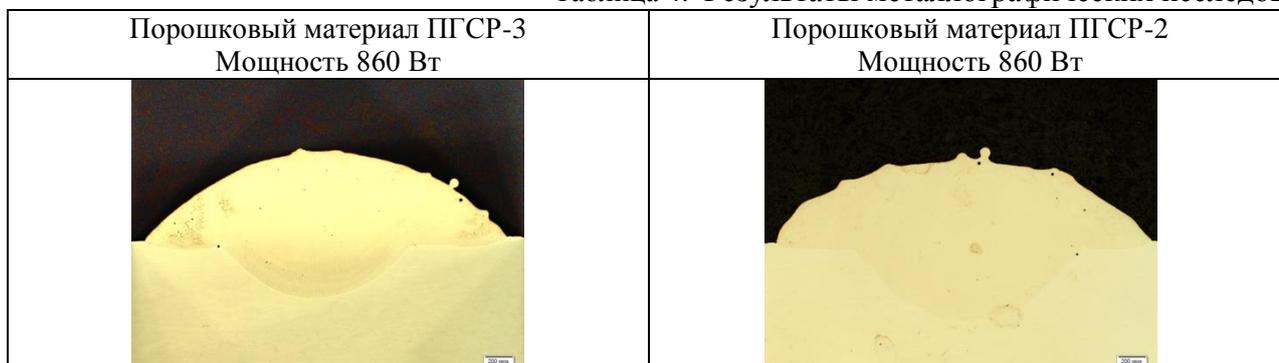
В качестве лазерного источника использовался иттербиевый волоконный лазер мощностью 4 кВт. Газопорошковая наплавка осуществлялась с помощью метода коаксиальной подачи порошкового материала. В качестве защитного газа использовался аргон высокой чистоты. Предварительно была осуществлена просушка порошкового материала и подогрев подложек. Подогрев производился непосредственно перед нанесением покрытий и составлял 300 С⁰. В качестве подложек использовались образцы из стали 3 и нержавеющей стали толщиной 5 мм. Режимы нанесения порошкового материала представлены в таблице 3.

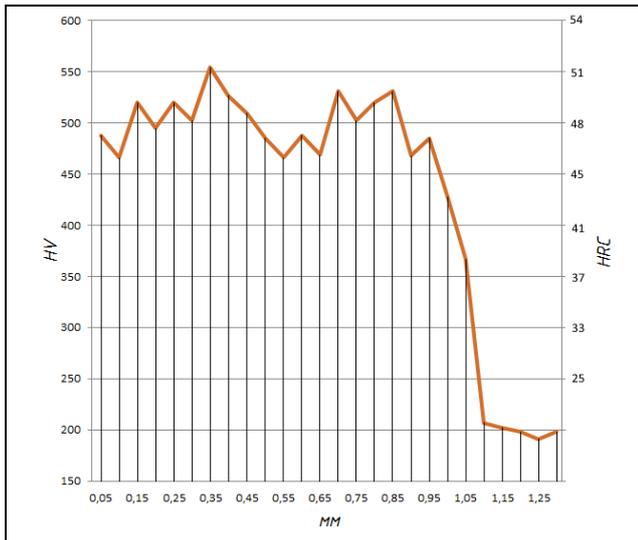
Таблица 3. Таблица режимов

Подложка	P, кВт	V, мм/с	F ₁ ПГСР-2, г/с	F ₂ ПГСР-3, г/с	Шаг, мм
Ст 3	0.86	5	7.641	-	1.8
Ст 3	0.86	5	-	7.295	1.8
Ст 3	1.032	5	7.641	-	1.8
Ст 3	1.032	5	-	7.295	1.8
Нерж.	0.86	5	7.641	-	1.8
Нерж.	0.86	5	-	7.295	1.8
Нерж.	1.032	5	7.641	-	1.8
Нерж.	1.032	5	-	7.295	1.8

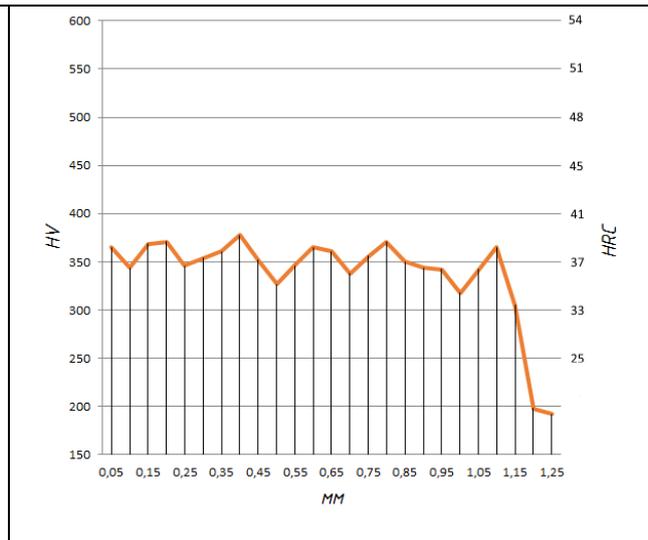
Обработка результатов заключалась в проведении металлографического исследования, измерения твердости полученного покрытия и химического состава на поверхности покрытия. Результаты исследований представлены в таблице 4. Исследования на химический состав производились на рентгенофлуоресцентном спектрометре на базе оборудования предоставленного НИТИ МИСиС.

Таблица 4. Результаты металлографических исследований

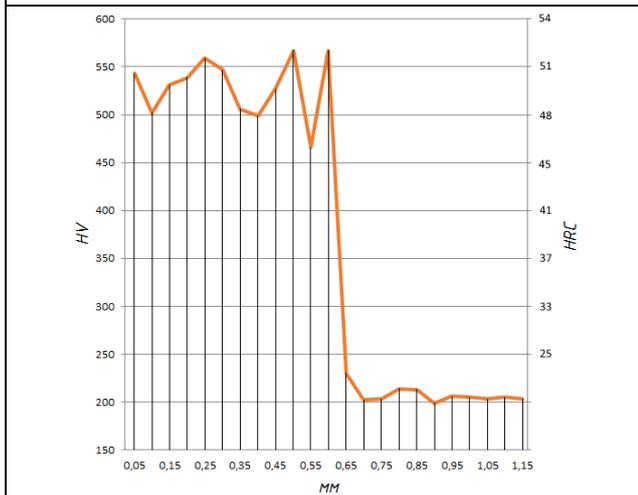
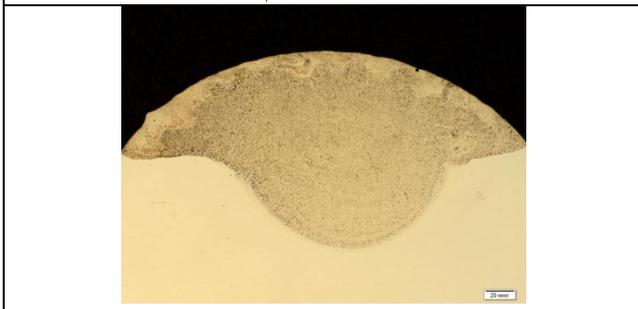




Мощность 1032 Вт



Мощность 1032 Вт



Химический состав покрытия на основе ПГСП-3
Формула Ni - Cr - Co - Mo

Элемент	Масс. доля, %
Fe	46.180
Ni	33.250
Cr	14.250
Mo	1.720
Si	1.390
Al	1.110
Mn	1.030



Химический состав покрытия на основе ПГСП-2
Формула Fe - Ni

Элемент	Масс. доля, %
Fe	87.990
Ni	10.520
Si	0.391
Mn	0.383
Cr	0.344
Na	0.123
Al	0.097

Na	0.304			Cu	0.065
Cu	0.242			S	0.019
Co	0.177			P	0.016
W	0.157			Mo	0.015
V	0.054			K	0.015
Ca	0.043			Ca	0.011
S	0.026			Cl	0.007
P	0.024			V	0.003
Cl	0.010			Ti	0.002

Выводы:

Проведенные исследования показали, что твердость покрытий из сплава ПГСП-2 с ростом коэффициента перемешивания упала с 45 до 37 HRC, а твердость покрытий из сплава ПГСП-3 составляет не более 50 HRC для обеих плотностей мощности. Химический состав наплавленного слоя резко отличается от состава как подложки, так и наплавляемого порошка. Для более объективной оценки химической неоднородности сплава в покрытии измерения химического состава необходимо проводить по точкам от линии сплавления к поверхности.

Литература

1. C. Theiler, T. Seefeld, G. Sepold Deposition of graded metal matrix composites by laser beam cladding. Bias Bremen Institute of Applied Beam Technology, Germany. – 2005
2. E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin. Laser Cladding. CRC Press, 2005 – С 260
3. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

УДК 539.23**СОЗДАНИЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ**

Глеб Николаевич Дубровин⁽¹⁾, Александр Евгеньевич Дубровин⁽²⁾, Иван Валерьевич Куликов⁽²⁾

Студент 5 курса⁽¹⁾, аспирант 2 года⁽²⁾

кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.В. Богданов

кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

Введение

Термоэлектрические явления в твердых телах находят применение в различных областях техники. Эффект Зеебека (термо-ЭДС) используется для преобразования тепловой энергии в электрическую. Перенос тепла электрическим током (эффект Пельтье) лежит в основе действия твердотельных охлаждающих и термостатирующих устройств[1].

В 1834 году французский физик Жан Пельтье обнаружил, что при протекании постоянного электрического тока через цепь из различных проводников, место соединения проводников охлаждается или нагревается в зависимости от направления тока. Количество поглощаемой теплоты пропорционально току, проходящему через проводники.

В результате работ российского академика А.Ф. Иоффе и его сотрудников, были синтезированы полупроводниковые сплавы, которые позволили применить этот эффект на практике и приступить к серийному выпуску термоэлектрических охлаждающих приборов для широкого применения в различных областях человеческой деятельности.

Единичным элементом термоэлектрического модуля (ТЭМ) является термопара, состоящая из двух разнородных элементов с р- и n- типом проводимости. Элементы соединяются между собой при помощи коммутационной пластины из меди. В качестве материала элементов традиционно используются полупроводники на основе висмута, теллура, сурьмы и селена.

Термоэлектрический модуль (Элемент Пельтье) представляет собой совокупность термопар, электрически соединенных, как правило, последовательно. В стандартном элементе Пельтье термопары помещаются между двух плоских керамических пластин на основе оксида или нитрида алюминия (рис.1). Количество термопар может изменяться в широких пределах - от единиц до сотен пар, что позволяет создавать ТЭМ практически любой холодильной мощности - от десятых долей до сотен ватт.



Рис. 1. Объемный термоэлектрический модуль

При прохождении через элемент Пельтье постоянного электрического тока между его сторонами образуется перепад температур -одна сторона (холодная) охлаждается, а другая (горячая) нагревается. Если с горячей стороны ТЭМ обеспечить эффективный отвод тепла, например, с помощью радиатора, то на холодной стороне можно получить температуру, которая будет на десятки градусов ниже температуры окружающей среды. Степень охлаждения будет пропорциональной величине тока. При смене полярности тока горячая и холодная стороны элемента Пельтье меняются местами[2].

Термоэлектрические преобразователи энергии обладают уникальными сочетаниями конструктивных и эксплуатационных характеристик, таких, как отсутствие движущихся деталей, рабочих жидкостей и газов, высокая надежность, возможность эксплуатации в течение нескольких лет без обслуживания или при минимальном периодическом обслуживании и др. Эти достоинства определяют многообразие использования термогенераторов в качестве источников электропитания, главным образом для автономных систем - в космосе, в труднодоступных районах суши и моря, для имплантируемых кардиостимуляторов и т.п. Термоэлектрические холодильники и термостаты применяются в приборостроении, СВЧ-электронике, ИК-технике, медицине, биологии, бытовой технике. Широк также спектр применения термоэлектрических приборов в измерительной технике, термометрии, калориметрии, пирометрии, электроизмерениях и т.д.

Многие задачи, которые практика ставит перед разработчиками термоэлектрических устройств, могут быть успешно решены с применением пленочных термоэлементов (ПТЭ) и пленочных термобатарей (ПТБ) (рис. 2).

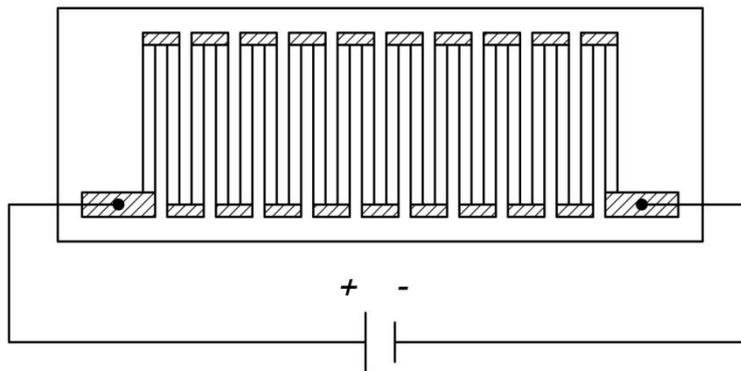


Рис. 2. Пленочный термоэлемент

Одно из главных достоинств ПТБ - возможность принципиально увеличить число элементов при сохранении объема преобразователя, а при необходимости - создавать микроминиатюрные устройства. На основе ПТБ могут быть изготовлены малогабаритные источники питания, слаботочные микрохолодильники и термостаты, высокочувствительные и достаточно малоинерционные датчики температуры и теплового потока и т.п.[1,3,4,5]. Вакуумные технологии изготовления улучшают качество ПТБ, позволяют достичь высокой точности осаждения полупроводников на полиимидные подложки. Одной из таких технологий является импульсное лазерное осаждение (ИЛО).

Импульсное лазерное осаждение (с англ. PLD – «Pulsed Laser Deposition») – уникальный технологический процесс, позволяющий наносить на поверхность деталей обладающие специальными свойствами материалы (металлы, карбиды и т.п.), добываясь, таким образом, восстановления геометрии, повышения поверхностной прочности, коррозионной устойчивости, снижения трения и прочих эффектов.

Схема импульсного лазерного осаждения представлена на рис. 3. Принцип работы оборудования для импульсного лазерного осаждения заключается в следующем. В течение импульса лазерный луч эксимерного лазера (а), проходя через кварцевое окно (б) попадает в вакуумную камеру и фокусируется на поверхности мишени (в), закрепленной на карусели (г). Взаимодействие высокоэнергетического лазерного импульса с материалом мишени приводит к образованию целого ряда продуктов, среди которых присутствуют не только электроны, ионы и нейтральные частицы, но и твердые микрочастицы материала мишени, отрывающиеся при взрывообразном испарении материала. Образованная плазма распространяется нормально к поверхности мишени и достигает подложки (е), осаждаясь в виде тонкой пленки испаренного материала (ж). Подложка имеет возможность подогрева с помощью нагревателя (и). Для равномерности испарения и осаждения, подложке и мишени придаются вращательные движения, а также производится нагрев подложки[6].

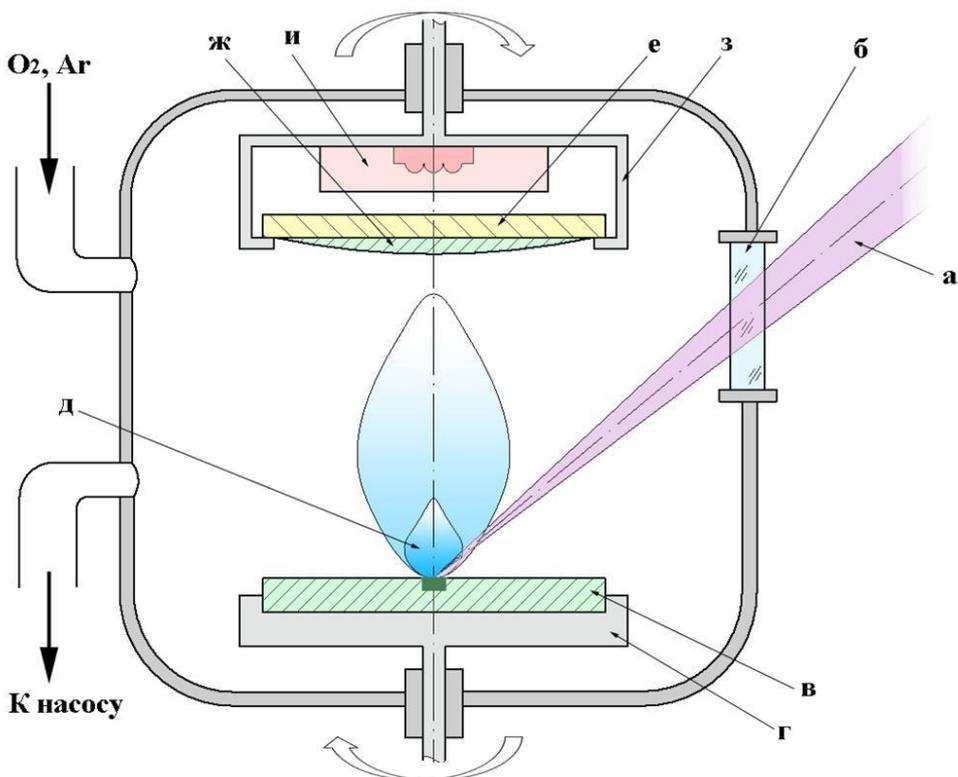


Рис. 3. Схема импульсного лазерного осаждения

Специфические проблемы возникают при разработке конструкций ПТБ. Большое влияние оказывает паразитный теплоперенос по подложке и теплообмен с окружающей средой. Последний обусловлен сильно развитой поверхностью термоэлектрических ветвей; их длина и ширина на несколько порядков превосходят толщину. К указанным проблемам следует добавить принципиальную сложность подвода и съема тепла при малой (порядка нескольких микрон) толщине термоэлементов[1].

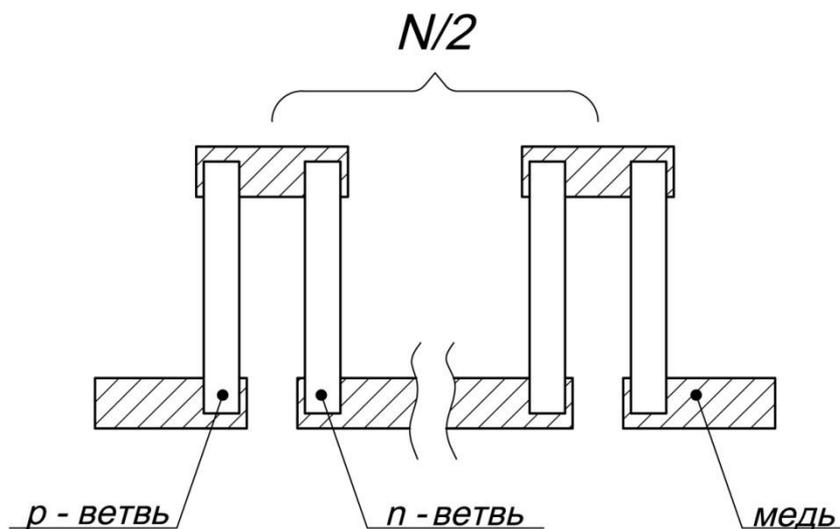


Рис. 4. Принципиальная схема пленочного термоэлемента

В работе [6] методом импульсного лазерного осаждения получены тонкие пленки термоэлектрического материала на основе теллурида висмута Bi_2Te_3 . Исследованы зависимости влияния технологических параметров на качественные параметры получаемых слоев, проведён анализ стехиометрии и шероховатости поверхности. Однако, для создания ПТБ необходимо решить вопрос о подключении изготавливаемого модуля к источнику постоянного тока (в

случае эффекта Пельтье) или к питаемому прибору (в случае эффекта Зеебека). Для обеспечения теплового и электрического контакта необходимо создать зону проводника на полиимиде (рис. 4). Выходное напряжение в ПТБ такого типа пропорционально количеству термопар N .

Полиимид фольгированный марок ПФ-1, ПФ-2 представляет собой композиционный материал, состоящий из полиимидной пленки и клея на основе эпоксидно-каучуковой композиции, облицованный с одной или двух сторон медной электролитической фольгой с гальваностойким покрытием. Предназначен для изготовления гибких печатных плат, кабелей, шлейфов. ПФ-Х-35-Х:

- П - полиимид;
- Ф - фольгированный;
- Х - 1, 2 - облицованный фольгой с одной или двух сторон;
- 35 - толщина фольги, мкм;
- Х - 0,1; 0,16 - толщина материала, мм[7].

На таком полиимиде представляется возможным создать необходимые зоны контакта проводника. Процесс получения необходимой геометрии токопроводящего рисунка идентичен с получением такого рисунка на гибких печатных платах. Соответственно, можно использовать уже известные технологии:

1. Химический способ изготовления печатных плат из готового фольгированного материала состоит из двух основных этапов: нанесение защитного слоя на фольгу и травление незащищенных участков химическими методами. В промышленности защитный слой наносится фотолитографическим способом с использованием ультрафиолетово-чувствительного фоторезиста, фотошаблона и источника ультрафиолетового света. Фоторезистом сплошь покрывают медь фольги, после чего рисунок дорожек с фотошаблона переносят на фоторезист засветкой. Засвеченный фоторезист смывается, обнажая медную фольгу для травления, не засвеченный фоторезист фиксируется на фольге, защищая её от травления. Фоторезист бывает жидким или пленочным. Жидкий фоторезист наносят в промышленных условиях, так как он чувствителен к несоблюдению технологии нанесения. Пленочный фоторезист популярен при ручном изготовлении плат, однако он дороже. Фотошаблон представляет собой УФ-прозрачный материал с распечатанным на нём рисунком дорожек. После экспозиции фоторезист проявляется и закрепляется как и в обычном фотохимическом процессе. Далее следует процесс травления, после которого защитный рисунок с фольги смывается.

2. Механический способ изготовления предполагает использование фрезерно-гравировальных станков или других инструментов для механического удаления слоя фольги с заданных участков.

3. Лазерная гравировка печатных плат до недавнего времени была слабо распространена в связи с хорошими отражающими свойствами меди на длине волны наиболее распространенных мощных газовых СО лазеров. В связи с прогрессом в области лазеростроения сейчас начали появляться промышленные установки прототипирования на базе лазеров[8].

На основе рассмотренных методов получения проводящего рисунка на поверхности полиимида, можно сделать вывод, что для создания макетных образцов термоэлектрических модулей в лабораторных условиях лучше других зарекомендовал себя химический способ травления с использованием пленочного фоторезиста, т.к. он не требует наличия специального оборудования.

Экспериментальная часть

При производстве гибких печатных плат в качестве диэлектрического основания используется малоусадочная пленка, которая характеризуется стабильностью физико-механических свойств и линейных размеров. Осуществив травление полиимида можно получить медные контакты для осаждаемых полупроводников. Полупроводники такие же, как и в работе [6]:

- р - $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Sb}_{1,5}$
- n - $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se}_{0,3}$

Этапы подготовки подложки

1. Создание фотошаблона

В данном случае фотошаблон - это полимерная пленка со сформированным на ее поверхности рисунком, не пропускающего актиничное излучение, т.е. излучения способного оказывать фотографическое действие на светочувствительный материал. В качестве такой плёнки использовалась прозрачная полиэстеровая пленка фирмы Lomond. С помощью лазерного принтера на неё наносился необходимый рисунок (рис.5).



Рис. 5. Фотошаблон

Необходимо отметить, что рисунок на фотошаблоне должен иметь высокую плотность. Как будет показано далее, это может стать решающим фактором для качества получаемой металлизированной поверхности. Если получившийся рисунок на фотошаблоне недостаточно плотный (имеются места серого цвета или просветы), то повысить плотность можно с помощью дихлорэтана, применяемого в хромолитографии. Подставив фотошаблон под пары этого вещества можно заметно увеличить плотность печати.

2. Подготовка поверхности фольгированного полиимида

Для создания макетных образцов термоэлектрических модулей был выбран фольгированный полиимид марки ПФ-1:

Полиимид фольгированный односторонний ПФ-1-35-0.1 240 x 260 мм

Толщина фольги - 35 мкм

Толщина материала - 0,1 мм (100 мкм)

Использование двухстороннего полиимида (марки ПФ-2) нецелесообразно, т.к. напыление полупроводниковых материалов производится только на одну сторону плёнки.

Важную роль в процессе травления полиимида играет чистота его поверхности. Поэтому необходимо во-первых, создать однородную поверхность, убрав все царапины с помощью, например, ластика, но при этом сильно не повредить слой меди. Во-вторых, избавиться от жировых пятен, если такие имеются, с помощью ацетона или спирта. После этого рабочую поверхность полиимида не следует трогать руками. Невыполнение этих требований в дальнейшем может привести к некачественному контакту полиимида с фоторезистом.

3. Выбор и нанесение пленочного фоторезиста

Фоторезист - это полимерный светочувствительный материал. Наносится на обрабатываемый материал в процессе фотолитографии или фотогравировки с целью получить соответствующее фотошаблону расположение окон для доступа травящих или иных веществ к поверхности обрабатываемого материала.

Следует отметить, что фоторезист может быть двух типов: негативный и позитивный. В позитивных фоторезистах, проэкспонированные области становятся растворимыми и после проявления в проявителе разрушаются. Такие фоторезисты, как правило, позволяют получать более высокие разрешения нежели негативные, но стоят дороже. В негативных фоторезистах, проэкспонированные области полимеризуются и становятся нерастворимыми, так что после проявления растворяются только не проэкспонированные области. Негативные фоторезисты, как правило, обладают более высокой адгезией по сравнению с позитивными, и более устойчивы к травлению[9].

Исходя из того, что негативные фоторезисты более устойчивы к травлению для создания металлизированной поверхности был выбран негативный фоторезист «OrdylAlpha 350».

Производитель: ELGAEurope(Италия)

Толщина светочувствительного слоя: 50 мкм

Разрешающая способность: 50/60 мкм проводник/зазор

Экспонирование УФ-лампами в диапазоне 360-380 нм

Энергия экспонирования: 70 мДж.

У фоторезиста одна сторона из лавсана (блестящая), другая из полиэтилена (матовая). К полиимиду его надо прикрепить матовой стороной, для этого следует снять защитную плёнку и наклеить фоторезист, при этом не допуская попадание грязи между соединяемыми поверхностями и образования пузырьков воздуха. Далее необходимо плотно прижать фоторезист к поверхности полиимида. Для этого, при отсутствии ламинатора, можно использовать бытовой утюг, прижав им образец с небольшим усилием при температуре до 100°C. Теперь следует снять верхнюю защитную плёнку и закрепить на поверхности фоторезиста фотошаблон.

4. Экспонирование фоторезиста с помощью ультрафиолетового излучения

Экспонирование осуществляется с помощью ультрафиолетового излучения. Полиимид с нанесённым на него фоторезистом и приложенным фотошаблоном размещаются под стеклом толщиной 3-4 мм. На высоте порядка 100 мм располагается источник УФ-излучения. В данном случае это ультрафиолетовая лампа мощностью 26 Вт. Время экспонирования 1 мин. Подбор времени экспонирования осуществляется экспериментальным путём. На небольшую полосу полиимида наносится фоторезист и делается фотошаблон с пронумерованными ячейками – это отметки времени. После включения лампы закрываем непрозрачным материалом подготовленный образец с закреплённым на нем фотошаблоном так, чтобы под излучение попадал только 1-ый номер ячейки фотошаблона. Теперь через одинаковые промежутки времени, например, в 30 секунд, перемещаем непрозрачный материал на последующие номера. Далее проявляем весь образец и ячейка, где фоторезист имеет лучшее качество определяет оптимальное время экспонирования для выбранного расстояния и мощности лампы.

После окончания процесса экспонирования образец вынимается из-под стекла и снимается фотошаблон, который можно использовать для создания следующих образцов. Взаимодействие фоторезиста с ультрафиолетовым излучением привело к изменению цвета.

5. Проявление фоторезиста

Для этого процесса рекомендован раствор каустической соды (NaOH) в расчёте 1 чайная ложка на 250 мл воды. В полученный раствор помещается образец. Через небольшой промежуток времени (порядка 30 с) в местах где находились тёмные зоны фотошаблона фоторезист начинает смываться. Ускорить процесс можно с помощью ватного диска, поступательными движениями без усилий помогая смыть лишний фоторезист. Положительный результат достигается когда весь лишний фоторезист удаляется, медь светлая и блестящая, как и до приклеивания фоторезиста, а островки меди с засвеченным фоторезистом имеют ровные края и сохраняют заданные размеры. После достижения положительного результата необходимо промыть образец водой, чтобы смыть с поверхности проявляющий раствор.

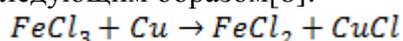
На данном этапе уже становится видно на сколько точно выполнен заданный технологический рисунок. Ряд проведённых экспериментов позволяет судить о причинах негативных результатов, например:

- 1) фоторезист полностью растворился в воде, значит, время экспонирования было недостаточным или расстояние до лампы слишком большим;
- 2) фоторезист не смылся – это говорит о том, что качество тёмных участков фотошаблона неудовлетворительное, вследствие чего, через них проходят лучи ультрафиолетового излучения и засвечивают ненужные участки или даже всю поверхность образца;
- 3) геометрические размеры «островков» меди больше, чем заданные – это означает, что прижим фотошаблона к образцу был недостаточно сильным.

6. Травление

Заключительным этапом подготовки образца из полиимида является его травление. Образец помещается в раствор хлорида железа (200-300г на 500мл воды). Для обеспечения оптимальных условий протекания реакции раствор должен иметь температуру порядка 30-40°C и постоянно перемешиваться. Для этих целей удобнее всего использовать компрессор для аквариума, перемешивающий раствор пузырьками воздуха. Длительность процесса составляет 30-40 минут.

Под травлением понимают химический процесс перевода меди в растворимые соединения. Незащищенная фоторезистом фольга травится, чаще всего, в растворе хлорного железа или в растворе других химикатов, например медного купороса, персульфата аммония, аммиачного медно-хлоридного, аммиачного медно-сульфатного, на основе хлоритов, на основе хромового ангидрида. При использовании хлорного железа процесс травления платы идет следующим образом[8]:



После окончания процесса травления необходимо достать образец из раствора, убедиться, что вся ненужная медь стравилась, и промыть его водой, чтобы смыть остатки хлорида железа. Теперь надо снять оставшийся фоторезист. Удобнее всего это сделать в том же растворе каустической соды, что и на этапе проявления. После этого опять промыть водой и оставить сушиться. Внешний вид протравленного образца в соответствии с выбранным шаблоном представлен на рис. 6.

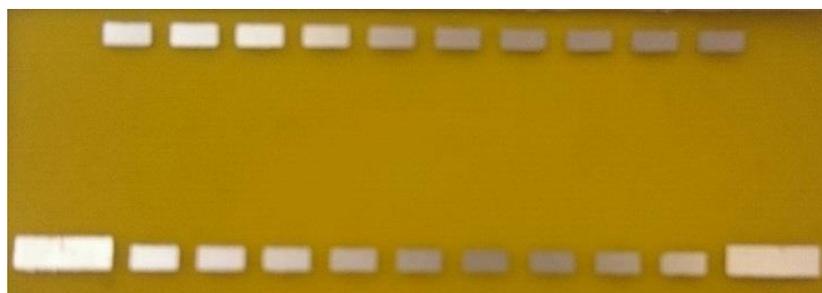


Рис. 6. Протравленный образец

Далее необходимо оценить качество поверхности меди на полученном образце. Наличие видимых пор и «термических ожогов», а так же отклонение от заданных геометрических размеров говорит о слишком большом времени травления.

Убедившись в пригодном качестве полученного образца можно приступать к процессу импульсного лазерного осаждения.

Заключение

В настоящей статье рассмотрены теоретические сведения о объёмных и пленочных термоэлементах, описаны их особенности. Литературный обзор отечественной и зарубежной литературы показал, что для обеспечения теплового и электрического контакта

между парами полупроводников пленочного термоэлектрического модуля необходимо создать металлизированную проводящую поверхность на подложке из полиимида.

На основе анализа существующих методов получения токопроводящего рисунка на поверхности фольгированного полиимида был выбран метод химического травления с использованием пленочного фоторезиста. Этот метод, по сравнению с другими, не требует наличия специального оборудования и может быть реализован в лабораторных условиях.

Экспериментально выявлены зависимости качества поверхности и геометрической точности токопроводящего рисунка от времени экспонирования и времени травления. Время экспонирования влияет на геометрическую точность, наиболее целесообразный диапазон засветки получился равным 1 мин для ультрафиолетовой лампы мощностью 26 Вт, находящейся на расстоянии 100 мм от образца. Время травления влияет на качество поверхности будущего модуля, наличие пор недопустимо потому, что они могут повлиять на контакт полупроводника с медью и привести к разрыву цепи. Оптимальное значение времени химического травления образца из фольгированного полиимида 30-40 минут в растворе $FeCl_3$ при температуре 30-40 °С.

Литература

1. Гольцман Б.М., Дашевский З.М., Кайданов В.И., Коломоец Н.В. Пленочные термоэлементы: физика и применение. М. Наука. 1985. 233 с.
2. Устройство термоэлектрического модуля (Элемента Пельтье) // <http://kryothermtec.com> URL: <http://kryothermtec.com/ru/technology> (дата обращения: 16.03.2015)
3. H. Stachowiak, S. Lassue, A. Dubernard, E. Gaviot / A thermoelectric sensor for fluid flow measurement. principles, calibration and solution for self temperature compensation // Flow Measurement and Instrumentation—V.9.—№3.—1998.—p 135–141.
4. F. Rettig, R. Moos / Direct thermoelectric gas sensors: Design aspects and first gas sensors // Sensors and Actuators B—V.143.—№1.—2007.—p 413–419.
5. R. Buchner, K. Froehner, Ch. Sosna, W. Benecke, W. Lang / Toward Flexible Thermoelectric Flow Sensors: A New Technological Approach // Journal of Microelectromechanical Systems— V. 17.—№ 5.—2008.—p1114–1119.
6. Шупенев А.Е. Особенности формирования субмикронных пленок теллурида висмута методом импульсного лазерного осаждения: магистерская диссертация. МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 2013. 100 с.
7. Полиимид фольгированный марок ПФ-1, ПФ-2 // <http://laborant.ru> URL: <http://laborant.ru/eltech/21/2/3/07-96.htm> (дата обращения: 16.03.2015)
8. С. Маркин / Как травить платы // Химия и Жизнь. № 7. 1990. с 76-77.
9. Фоторезист // Википедия. [2015]. Дата обновления: 31.01.2015. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=68290990> (дата обращения: 16.03.2015).

УДК 621.373.826

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Александр Михайлович Кулиш

Студент 4 курса

кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.И. Мисюров

кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

Появившиеся в конце 80-х, аддитивные технологии в наше время являются перспективными технологиями для мелкосерийного и единичного производства в различных областях машиностроения, медицины, самолето- и ракетостроения. Аддитивные технологии являются принципиально новыми методами в производстве различного рода изделий, в том числе и металлических. Их использование допускает как непосредственно создание изделий "с нуля", так и обработку уже имеющихся, причем изготовленный материал имеет механические и физические характеристики, идентичные свойствам материала, полученного традиционной ковкой или литьем.

В отличие от традиционных технологий порошковой металлургии аддитивные технологии позволяют:

- изготавливать детали из композиционного материала со 100%-ой плотностью;
- воспроизводить форму изделия по компьютерной модели, снижая потери материала при механической обработке;
- изменять состав материала во время нанесения согласно функциональной особенности поверхностной и внутренней части детали;
- получать материалы со специфическими свойствами, характерными только для лазерной обработки;
- использовать коммерчески доступные порошковые материалы;
- осуществлять локальное упрочнение (модификацию) рабочей детали [1].

В международном сообществе, так же, как и в России, устоявшейся классификации аддитивных технологий пока не принято. Различные авторы подразделяют их:

- по применяемым строительным или модельным материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т. д.);
- по наличию или отсутствию лазера;
- по методам подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т. д.);
- по методам формирования слоя [2].

В данной работе уделено внимание аддитивным технологиям, предусматривающим формирование детали переплавом металлопорошкового материала лазерным излучением. По методам формирования слоя существует два вида аддитивных технологий. Первый вид носит также название "селективный синтез" или "селективное лазерное спекание". В нем сначала формируют слой, например, насыпав на рабочую платформу порцию порошкового материала и разровняв порошок с помощью ролика или «ножа», создав таким образом ровный слой материала определенной толщины; затем выборочно (селективно) обрабатывают порошок в сформированном слое лазером, скрепляя частички порошка (сплавляя или склеивая) в

соответствии с текущим сечением исходной модели. При этом часть порошка в созданном слое остается нетронутой (рисунок 1, [2]).

Как видно из рисунка, лазерное излучение системой зеркал переносится в плоскость построения, где по мере формирования слоя платформа построения опускается и лазерное излучение формирует слой "связанного" материала уже из вновь созданного слоя порошка, который подается выдвиганием платформы подачи материала и выравнивается в ровный слой роликом.

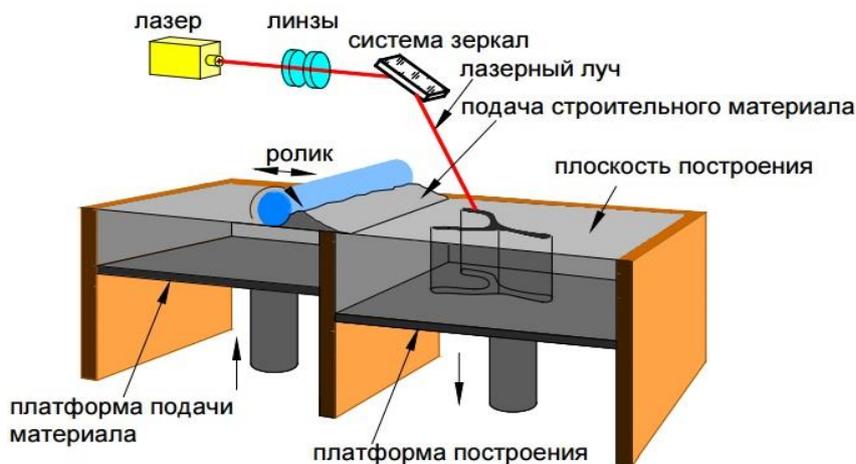


Рис. 1. Технология селективного лазерного спекания

Второй вид можно назвать как "непосредственное (прямое) осаждение материала", в котором не формируется слой материала перемещением лазерного излучения в соответствии с моделью, а материал подается непосредственно в зону куда подается и лазерное излучение. В данном случае уже будет перемещаться в соответствии с моделью детали сопло, из которого подается как порошковый материал, так и лазерное излучение, то есть лазерное излучение и порошковый материал перемещаются как единое целое (рисунок 2, [2]).

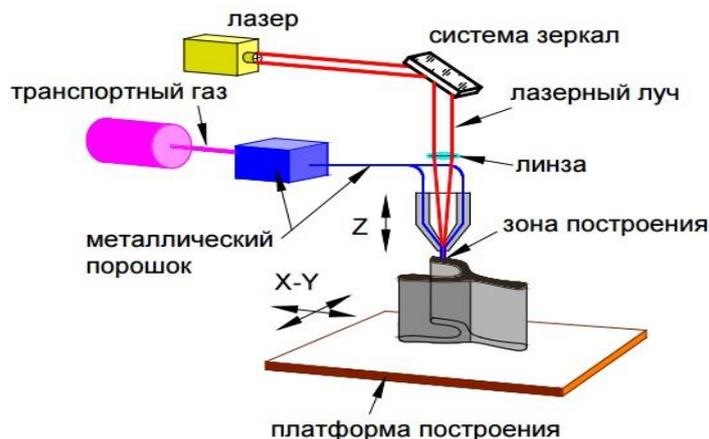


Рис. 2. Технология прямого осаждения материала

В случае, если для технологии применяются не самофлюсующиеся порошки, то процесс "выращивания" целесообразно проводить одновременно с подачей инертного газа, таких как аргон или гелий для защиты материала от окисления на воздухе. В этом случае, газ будет играть роль не только транспортного, но и защитного. На рисунке 2 показан вариант коаксиальной подачи защитного газа. В обоих случаях готовая деталь получается послойным скреплением (склеиванием, сплавлением) частичек порошка в соответствии с требуемым сечением модели для получения готового изделия.

Аддитивные технологии являются сильно развивающимися в настоящее время для изготовления различного рода деталей, в частности, благодаря росту номенклатуры различных порошковых материалов. Также, анализ и ряд опытов показывают, что во многих случаях применение аддитивных технологий позволяет получать изделия экономически более выгодными, с лучшими показателями качества и с приемлемыми параметрами (масса, сложность формы). Аддитивные технологии предпочтительны, когда, например, требуется восстановить поврежденную форму довольно дорогих изделий таких как лопатки газотурбинных двигателей.

Но, несмотря на все значительные преимущества аддитивных технологий, существует много проблем, связанных с получением требуемых качеств и свойств деталей. Опыт работ в МГТУ и данные многих научно-исследовательских работ показывают низкую технологическую прочность выращиваемых деталей, особенно на основе никеля. Это и трещинообразование, порообразование, наличие дефектов в зависимости от фракционного состава, неоднородностей порошка. Поэтому, целью данной работы является выявление технологических особенностей формирования деталей из порошка на основе никеля.

Никель и сплавы на его основе являются жизненно важными для современной промышленности из-за их способности выдерживать широкий спектр операционных нагрузок с участием как агрессивных сред, так и высоких температур, а также комбинации этих факторов [3].

Существует несколько способов получения металлопорошковых материалов на основе никеля, в зависимости от которых, порошки находят свое применение в разных областях промышленности и машиностроения. К ним относятся:

- карбонильный метод (метод получения порошков путем разложения тетракарбонил никеля NiCO_4);
- гидрометаллургический метод (металлосодержащий материал подвергается процессу восстановления);
- механический метод размолла в мельницах;
- механический метод получения порошков атомизацией (диспергирование расплавов посредством струи газа или жидкости);
- электролитический метод (разложение водных растворов соединений никеля) [4].

Карбонильный метод предусматривает получение чистого никеля, который широко применяется в электронике, химических процессах, нефтяной промышленности. Стоит также выделить композиты на его основе. Например, термоактивные композиции "никель-металл" (Ni-Al, Ni-Ti), "никель-карбид" (Ni-WC), "никель-оксид" (Ni-ZrO₂), и "никель-металл-оксид" (Ni-Al-WO₃), используются для нанесения устойчивых износостойких огнеупорных покрытий и теплоизоляционных покрытий. Также, карбонильные никелевые порошки характеризуются свободной текучестью, хорошей сжимаемостью и легкостью для спекания [4].

Гидрометаллургическим методом также получают чистый никель с незначительным содержанием примесей. Этот метод рассчитан на получение никеля из широкого ассортимента сырьевого материала, но, в основном, из материалов с концентрациями сульфидов. Среди композитных порошков на основе никеля можно выделить: Ni-C порошки (50-85%Ni) для турбинных лопаток; Ni-Al (80-82% Ni) порошки для нанесения покрытий на работающие части поршней роторных двигателей; никелевые порошки с карбидами, нитридами, боридами для нанесения на поверхности плазменных генераторов и производства режущих инструментов и Ni+Cr+Al порошки для клапанов, нагреваемых сопел, сопел турбин, работающих в условиях высоких температур и скоростях потока [4].

Электролитическим методом получают как чистый никель, так и сплавы на его основе такие как: никель-хром, никель-теллур, никель-кобальт, никель-цинк, никель-железо [4]. Этот метод характеризуется невысокой производительностью и высокой себестоимостью

получаемого порошка, поэтому, несмотря на чистоту и высокие технологические свойства получаемых порошков, этот метод для аддитивных технологий не применяется.

Указанные выше методы относятся к физико-химическим методам получения никелевых порошков и для них характерно то, что химический состав и структура конечного порошка сильно отличается от исходного материала [2].

Механические методы наиболее популярны для производства металлопорошковых материалов для аддитивных технологий за исключением метода размолла в мельницах, так как частицы порошка при этом методе имеют осколочную, неправильную форму, а для аддитивных технологий наиболее подходящая форма частиц порошка - сферическая [2]. Метод получения никелевых порошков атомизацией является наиболее производительным, экономичным и эффективным методом получения мелких и средних порошков. Распыление (атомизацию) широко применяют при производстве порошков многокомпонентных сплавов, в частности, с аморфной структурой, которая позволяет достичь равномерного химического состава композиции, даже при содержании легирующих компонентов выше их предела растворимости в основном компоненте сплава. Кроме того, порошки, полученные с использованием методов диспергирования расплавов, имеют форму частиц, близкую к сферической [2].

К атомизированным никелевым порошкам можно отнести две большие группы порошковых материалов: порошки для твердых сплавов и порошки для так называемых "суперсплавов".

Коммерчески доступные никелевые твердые сплавы могут быть поделены на три группы: боросодержащие сплавы, сплавы, содержащие карбиды и сплавы с фазой Лавеса. В основном, используется состав Ni-Cr-B-Si (порошок серии ПГ-СР), который является самофлюсующимся из-за присутствия бора и кремния. Твердость этих сплавов определяется в зависимости от содержания хрома, бора и кремния. Сплавы содержащие много бора и хрома (Ni-15.5Cr-3.5B-0.8C) имеют высокую стойкость к абразивному изнашиванию, но низкую ударную вязкость. С добавлением к ним таких элементов как молибден или медь повышается коррозионная стойкость и стойкость к питтинговой коррозии. Эти порошковые сплавы имеют хорошую абразивную стойкость и износостойкость типа металл-металл, хотя "горячая" твердость и коррозионная стойкость в некоторой степени ниже чем в сплавах на основе кобальта. Из карбидосодержащих никелевых сплавов можно выделить широко применяемый состав Ni-Cr-Mo-C. Сплавы на такой основе имеют хорошую коррозионную стойкость. Карбидосодержащие сплавы системы Ni-Cr-Mo-Co-Fe-W-C привлекательны как дешевая альтернатива сплавам на основе кобальта. Сплавы с фазой Лавеса (нестабильные интерметаллидные фазы Ni-Cr и Ni-B) характеризуются низким значением твердости, чем у сплавов, содержащих карбиды, но сохраняют механические свойства в широком диапазоне температур [4].

Под "суперсплавами" понимают сплавы с высокой прочностью при высоких температурах, которые используются в основном в двигателях турбин самолетов (лопатки газотурбинных двигателей) и генераторов энергии. Эти сплавы на никелевой основе, а также включают в себя "огнеупорные" элементы такие как молибден, кобальт, ниобий и тантал. Высокие жаропрочные свойства обеспечивают главным образом присутствующие γ' фазы интерметаллидов алюминия и титана, но и ряд упрочняющих элементов, указанных выше. За рубежом существует также альтернатива получения порошков для "суперсплавов" методом механического сплавления композитных металлических порошков с равновесными и неравновесными фазами от "простых" порошков. Содержание алюминия и хрома обеспечивает хорошую сопротивляемость окислению, в то время как титан, тантал и вольфрам обеспечивают сульфидное сопротивление (сопротивление сульфидному растрескиванию). Вольфрам и молибден также повышают прочность [4].

Наиболее распространенной проблемой в применении данного вида технологий является трещинообразование в никелевом материале формообразующих слоев получаемых деталей, а

точнее, высокая склонность к трещинообразованию. В случае наплавленных слоев, содержащих большое количество единичных валиков, трещины представляют собой разветвленную сетку (рисунок 3, [5]). Так, при восстановлении объемных элементов жаропрочных деталей для избегания трещин рекомендуют уменьшать толщину наплавляемого слоя до 0,2 мм [5].

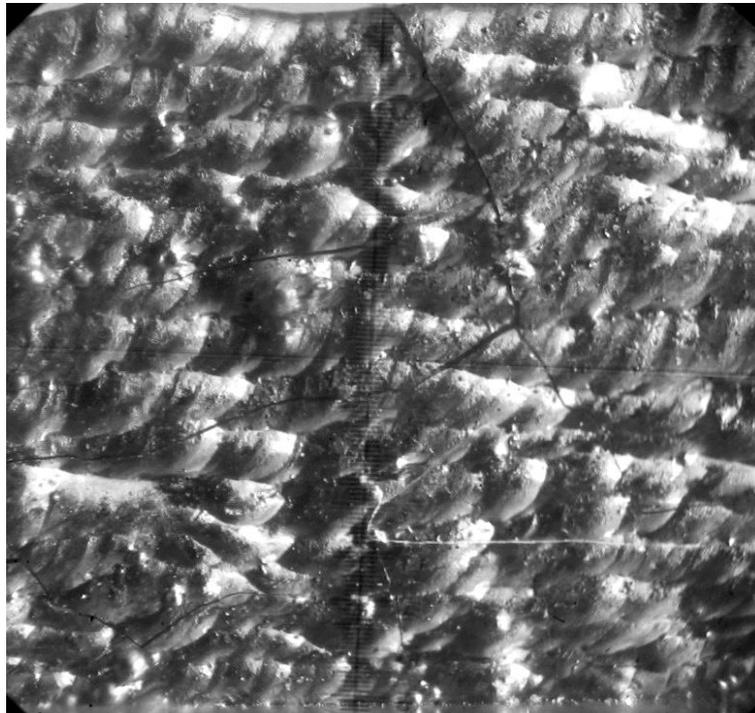


Рис. 3. Характер расположения трещин в наплавленном слое (вертикальная стенка), содержащем 16 валиков (вид сбоку), $\times 40$

В МГТУ имени Н. Э. Баумана на протяжении нескольких лет проводили работы по объемному выращиванию деталей [6-7] и по исследованию технологической прочности сплавов систем легирования Ni-Cr-B-Si [8]. Изучив топографию поверхности трещин, было установлено, что трещины носят кристаллизационный характер (рисунок 5, [5]).

Особенность разрушения наплавленных слоев связана с немонотонным изменением пластичности при охлаждении наплавленного металла (существуют "провалы" пластичности) (рисунок 4).

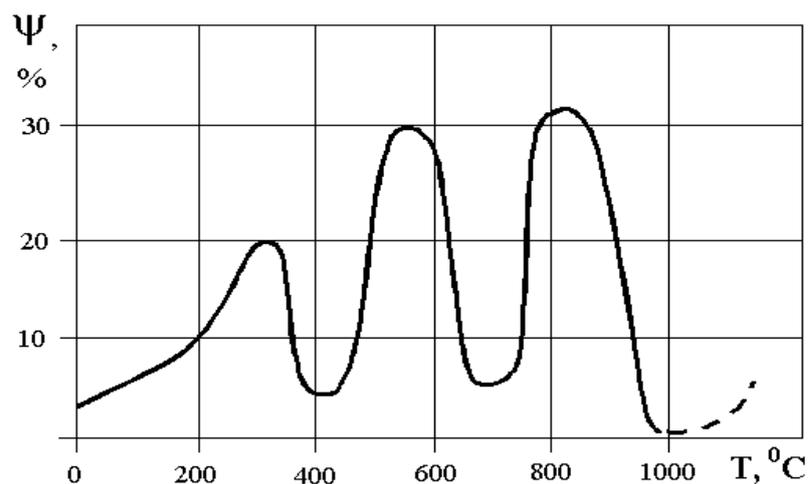


Рис. 4. Характер изменения пластичности (поперечного сужения) от температуры

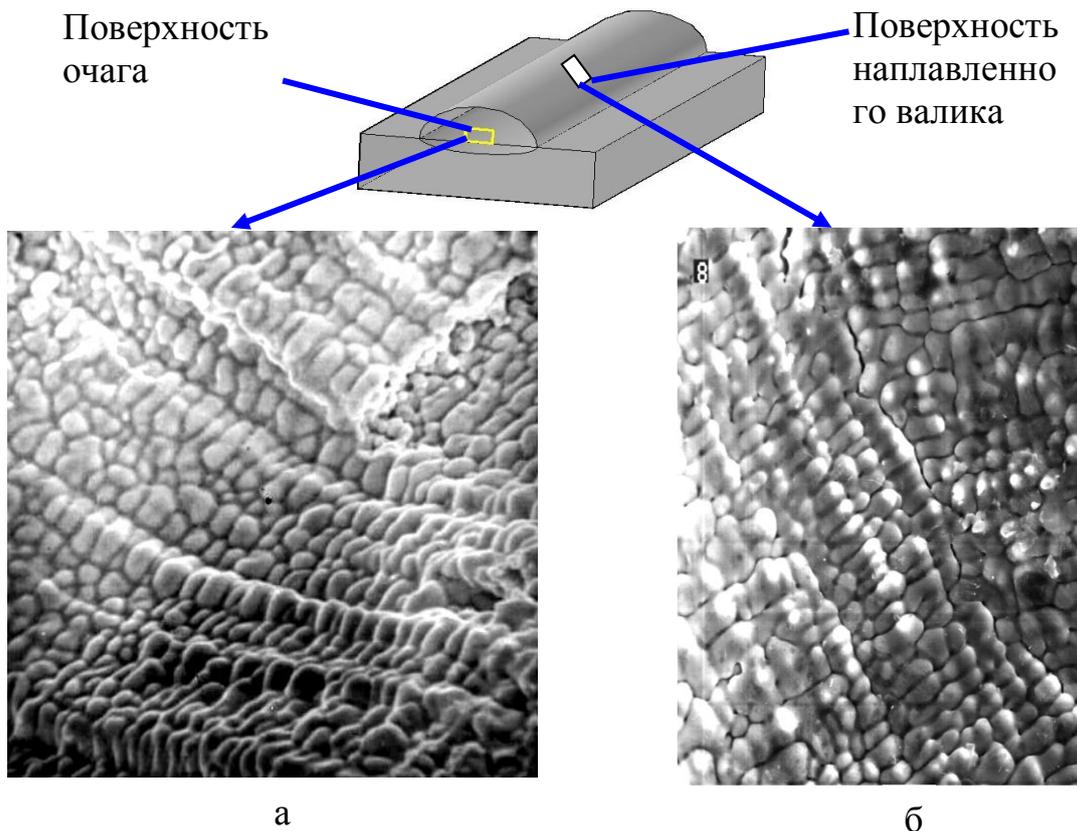


Рис. 5. Топография поверхности очага трещин, возникающих в наплавленных валиках (а) и топография свободной поверхности валика (б), наплавленного с использованием импульсно-периодического излучения порошками системы Ni-Cr-B-Si

Механизм образования трещин можно описать следующим образом. При затвердевании металла в температурном интервале кристаллизации образуются зародыши разрушения в виде кристаллизационных трещин. По мере остывания металла, происходит формирование остаточных напряжений в нем. При температуре порядка 400°С они имеют уже значительную величину, в то время как деформационная способность резко снижается. Кристаллизационный "надрыв" является концентратором, от которого в условиях высоких напряжений низких пластических свойств металла происходит макроразрушение.

Проведенный анализ позволил наметить пути повышения технологической прочности деталей из порошков на никелевой основе. Уменьшения вероятности появления кристаллизационного надрыва можно добиться уменьшением температурного интервала хрупкости (ТИХ), увеличением минимальной пластичности и снижением внешнего темпа деформаций.

Наиболее важной в данном случае является минимальная пластичность, зависящая от схемы кристаллизации и от типа макро- и микроструктуры. На эти характеристики можно

влиять изменением режима получения формообразующих слоев. Снижение остаточных напряжений связано с уменьшением зоны пластических деформаций, которую можно осуществить, изменяя параметры термического цикла.

Немаловажную роль на склонность к трещинообразованию играет химический состав материала. Так, увеличение содержания углерода в составе металлопорошкового материала увеличивает склонность к трещинообразованию [5].

В заключение, стоит отметить важность работ в данном направлении для повышения эффективности применения аддитивных технологий не только с экономической точки зрения, но и со стороны технологических свойств получаемых изделий. Прежде всего, необходимо разработать методику оценки сопротивляемости образованию трещин в процессе формирования изделий переплавом порошкового материала.

Литература

1. Новиченко Д.Ю. Разработка и исследование процесса прямого лазерного изготовления детали из композиционного материала на основе стали и карбида титана: авто-реф. дис. ... канд. тех. наук / Д.Ю.Новиченко ; Моск. гос. тех. ун-т. им. Н.Э. Баумана – М., 2011. – 18 с.
2. Довбыш В.М., Забеднов П.М., Зеленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла.
3. Properties of Nickel Alloys, *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 2000, p 8-10.
4. Neikov O.D., Naboychenko S.S., Dowson G. Handbook of non-Ferrous Metal Powders. Technologies and Applications/Amsterdam: Elsevier, 2009, p 368-406.
5. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Чжан Цин Формирование наплавленных слоев с использованием лазерного импульсно-периодического излучения. Сварочное производство, №8, 2007, с. 18-21.
6. Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Современные методы и оборудование для объемного формообразования деталей лазерным переплавом металлических порошков. Лазер-Информ, №5-6(284-285), март, 2004г., с. 1-3.
7. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Третьяков Р.С. Анализ влияния параметров коаксиальной лазерной наплавки на формирование валиков. Технология машиностроения, №11, 2011, с. 19-21.
8. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И. Возможности и перспективы применения лазерной наплавки. Технология машиностроения, 2005, №10 с. 52-56.

УДК 539.234

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ НА ФИЗИКО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК

Людмила Михайловна Ремез⁽¹⁾, Александр Евгеньевич Шупенёв⁽²⁾, Иван Валерьевич Куликов⁽³⁾

Студент 6 курса⁽¹⁾, аспирант 2 года^{(2), (3)}

кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.В. Богданов

кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

Введение

Одним из наиболее перспективных современных методов получения нанопленок является метод ИЛО (импульсного лазерного осаждения). ИЛО - уникальный технологический процесс, позволяющий наносить на поверхность деталей обладающие специальными свойствами материалы (металлы, карбиды и т.п.), добиваясь, таким образом, восстановления геометрии, повышения поверхностной прочности, коррозионной устойчивости, снижения трения и прочих эффектов.

ИЛО является одним из наиболее широко используемых методов при решении исследовательских задач связанных с разработкой методик формирования тонких пленок и исследования их свойств. Широкое использование метода определяется рядом его особенностей. Во-первых, при воздействии на вещество мощного лазерного импульса происходит практически мгновенное испарение тонкого слоя вещества мишени. При этом стехиометрия испаренного вещества соответствует стехиометрии исходной мишени, что является принципиальным моментом при получении пленок из многокомпонентных материалов. Во-вторых, процесс осаждения пленок можно проводить в широком диапазоне давлений фонового газа, от глубокого вакуума, до давлений ~ 1 Торр. Это позволяет получать пленки из материалов, которые имеют высокое давление насыщенных паров некоторых элементов из их состава. В-третьих, конструктивная простота метода ИЛО и отсутствие ограничений на вид испаряемого вещества позволяет оперативно получать пленки из материалов с различными свойствами без каких-либо конструкционных изменений в напылительном оборудовании.

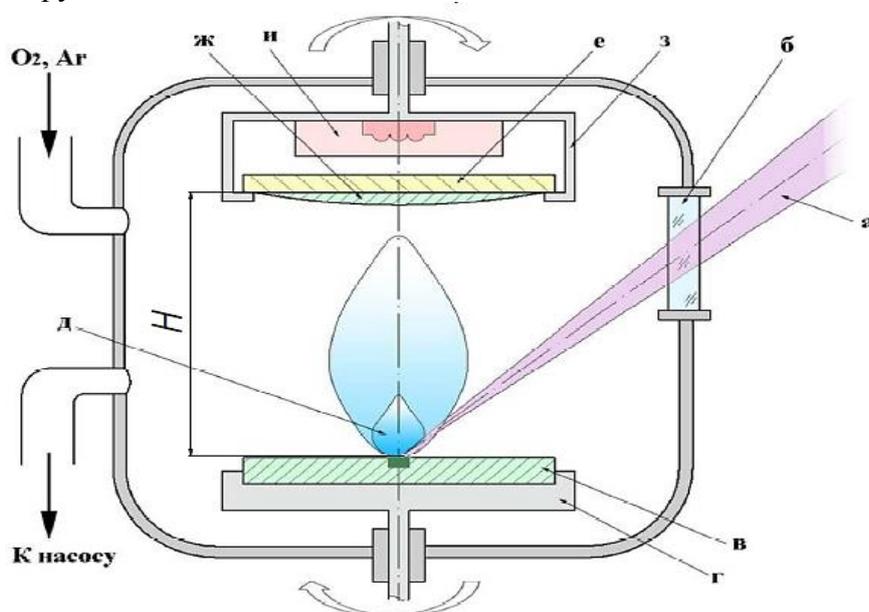


Рис. 1.Схема лазерного осаждения.

Схема импульсного лазерного осаждения представлена на рис. 1. Принцип работы оборудования для импульсного лазерного осаждения заключается в следующем. В течение импульса лазерный луч эксимерного лазера (а) проходит через кварцевое окно (б) попадает в вакуумную камеру и фокусируется на поверхности мишени (в), закрепленной на карусели (г). Взаимодействие высокоэнергетического лазерного импульса с материалом мишени приводит к образованию целого ряда продуктов, среди которых присутствуют не только электроны, ионы и нейтральные частицы, но и твердые микрочастицы материала мишени, отрывающиеся при взрывообразном испарении материала. Образованная плазма распространяется нормально к поверхности мишени и достигает подложки (е), осаждаясь в виде тонкой пленки испаренного материала (ж). Подложка имеет возможность подогрева с помощью нагревателя (и). Для

равномерности испарения и осаждения, подложке и мишени придаются вращательные движения, а также производится нагрев подложки.

Описание лабораторного оборудования

Нанофаб-100 является модульной технологической платформой для формирования нанотехнологических комплексов (НТК) с кластерной компоновкой, включающих технологические установки с возможностями групповых и нанолокальных методов обработки подложек диаметром до 100 мм. При формировании НТК кластеры связываются в технологические цепочки через модули межоперационной передачи и складирования образцов. Это позволяет на основе платформы Нанофаб-100 создавать нанофабрики для создания полнофункциональных наноструктур, наноустройств и наносистем на их основе.

Модуль PLD является полностью автоматизированным модулем импульсного лазерного осаждения (Pulsed Laser Deposition – PLD) с эксимерным KrF лазером. Модуль PLD позволяет осаждать монослои, многослойные структуры и комбинированные слои из различных материалов с неоднородностью по толщине $< 5\%$.

Технологические возможности модуля:

- Осаждение диэлектрических окисных слоев с термостатированием в атмосфере кислорода как во время процесса осаждения, так и после его окончания (стабилизирующий отжиг). Сочетание двух этих процессов позволяет гарантировать идентичность анионно-катионных составов осажденного слоя и материала мишени.
- Осаждение нитридных слоев с термостатированием в атмосфере азота.
- Осаждение металлических слоев нанометрового диапазона в атмосфере инертного газа.
- Получение нанотрубок и нанопроволок германия, кремния, золота и полупроводниковых соединений.

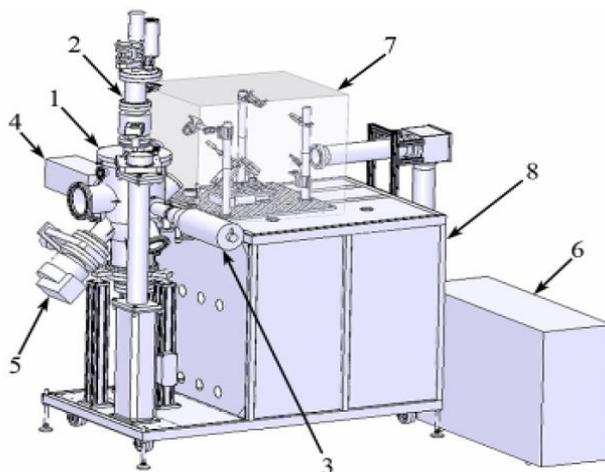


Рис. 2. Модуль PLD 1 – камера реактора; 2 – система позиционирования образца; 3 – электронно-лучевая пушка; 4 – ПЗС-камера; 5 – турбо-молекулярный насос; 6 – лазер; 7 – система ввода лазерного излучения; 8 – шкаф электроники

Устройство модуля PLD (рис. 2). Реакционная камера 1 модуля PLD выполнена из нержавеющей стали. На верхнем фланце камеры смонтирована система позиционирования образца 2. Доступ в камеру реактора осуществляется через верхний фланец, для чего узел системы позиционирования поднимается и отводится в сторону.

К одному из фланцев, расположенных в нижней части камеры крепится турбомолекулярный насос 5, обеспечивающий откачку до давления 5×10^{-8} мбар.

Для распыления мишеней используется эксимерный KrF лазер 6 с длиной волны 248 нм, длительностью импульса около 30 нс, частотой 10 Гц и энергией импульса на уровне 400 мДж. Лазер с внутренней прокачкой, обеспечивающей автономную работу в течение не менее 2 недель. Система ввода излучения 7 расположена в специальном закрытом газонаполненном

боксе, что позволяет избежать запыления и нежелательного перемещения воздушных масс. Для уменьшения поглощения ультрафиолета в воздушной атмосфере бокс может быть заполнен азотом.

Система ввода излучения включает механизм сканирования луча (далее – сканатор). Сканирование производится вдоль одной оси, мишень при этом вращается, что обеспечивает спиральную развертку по поверхности мишени. Таки образом, распыление материала мишени происходит равномерно по всей площади.

Окно ввода лазерного излучения представляет собой кассету со сменными прозрачными пластинами, что позволяет автоматически менять пластины по мере их загрязнения продуктами распыления непосредственно во время процесса осаждения.

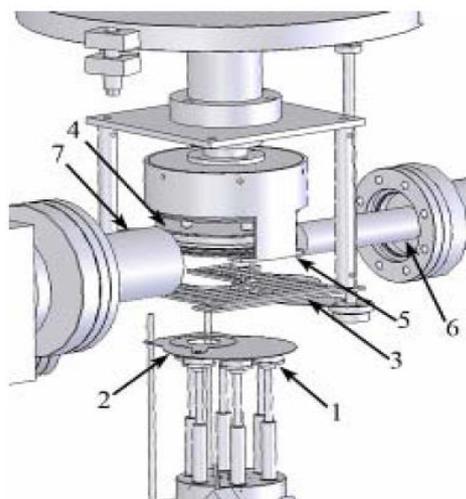


Рис. 3. Внутренне устройство камеры PLD: 1 – держатели мишеней; 2 – экран; 3 – нижний нагреватель; 4 – верхний нагреватель; 5 – держатель подложки; 6 – электронно-лучевая пушка; 7 – флуоресцирующий экран

В нижней части камеры расположена карусель мишеней (рис. 3). Конструкция карусели позволяет разместить либо 3 мишени диаметром 2", либо 6 мишеней диаметром 1". Над мишенями расположен экран 2 с отверстием, соответствующим диаметру мишени. Экран защищает материал неиспользуемых мишеней от осаждения вещества распыляемой мишени. Карусель поворачивается, располагая выбранную мишень напротив отверстия в экране. Держатели мишеней могут вращаться со скоростью до 30 об/мин, обеспечивая равномерное распыление.

Система позиционирования образца обеспечивает перемещение держателя образца 5 в трех плоскостях, а также поворот на произвольный угол относительно вертикальной оси.

Для нагрева образца используются два нагревателя резистивно-радиационного типа. Материал нагревателей гарантирует нагрев подложки в атмосфере кислорода с парциальным давлением ≤ 600 торр до температур 950 °С. Температура нагревателей измеряется двумя термопарами.

Исследование влияния технологических параметров на свойства пленок

Комплекс НАНОФаб обладает набором управляемых параметров, позволяющих менять условия осаждения пленок в широких диапазонах. Можно выделить несколько наиболее важных параметров:

- параметры лазерного излучения
- расстояние между мишенью и подложкой
- движение сканатора, мишени и подложки
- наличие газов в камере
- температура подложки

Рассмотрим влияние каждого из них подробнее.

Параметры лазерного излучения. Влияние энергии импульса лазерного излучения имеет пороговый характер. Для каждого материала имеется свое минимальное значение энергии, необходимое для испарения материала.

Выделяют 3 режима:

- мягкий – с плотностью мощности $q = 10^5 - 10^7$ Вт/см² с длительностью импульса $t = 10^{-3} - 10^{-6}$ с,
- средний - $q = 10^7 - 10^8$ Вт/см², $t = 10^{-8}$ с,
- жесткий - $q = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $t = 10^{-8}$ с.

На мягких режимах продукты лазерной эрозии состоят из легкодисперсной структуры и каплевидной фракции, при осаждении формируется пучковая структура пленки. Мягкие режимы используются для напыления Cr, W, Al и других однокомпонентных материалов. Энергия, подводимая к материалу мишени, меньше энергии диссоциации компонентов, что позволяет напылять стехиометрические слои многокомпонентных соединений (SiC, Al₂O₃, SiO₂ и др.)

При осаждении на средних режимах энергия, подводимая к мишени, примерно равна энергии диссоциации молекул, за счет чего при испарении происходит диссоциация, а при конденсации – ассоциация атомов в молекулы.

Средние режимы используются при напылении многокомпонентных полупроводниковых слоев (GaAs, CdS, InSb и др.).

Процесс напыления на жестких режимах (лазерно-плазменное напыление) соответствует процессу термовзрыва. Данному процессу присущи уникальные свойства:

- отсутствие нагрева конструктивных элементов в камере, вследствие чего обеспечивается высокая чистота пленок
- высокие скорости напыления
- возможность испарения даже самых тугоплавких веществ
- возможность конгруэнтного напыления

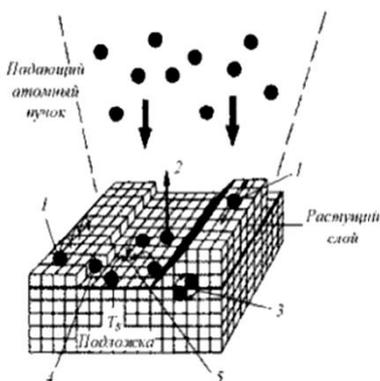


Рис. 4. Схематическое изображение поверхностных процессов, происходящих при выращивании тонкой пленки: 1 - поверхностная диффузия, 2 — десорбция, 3 — взаимодиффузия, 4 — встраивание в решетку, 5 — поверхностная агрегация (зародышеобразование).

Влияние температуры на скорость образования пленки: при формировании пленки происходят различные поверхностные процессы (рис. 4), такие как адсорбция, поверхностная и взаимодиффузия, десорбция и поверхностная агрегация. Все они зависят от температуры подложки, при повышении температуры процессы усиливаются и ускоряются. Так, например, коэффициент диффузии, количественно характеризующий скорость диффузии атомов на поверхности подложки, будет пропорционален температуре [6]:

$$D = \frac{l^2 v}{4 \exp \frac{E_a}{kT}}, \text{ где}$$

l - длина диффузионного прыжка,
 v - частота колебаний в латеральном направлении,
 E_a - активационный барьер диффузии,
 k - постоянная Больцмана,
 T - температура подложки.

На величину адсорбции температура влияет следующим образом: чем выше температура, тем активнее броуновское движение молекул, тем больше десорбция и меньше адсорбция.

Влияние температуры также стоит отметить на этапе зародышеобразования. При увеличении температуры подложки степень пересыщения понижается, среднее время жизни адсорбированного атома уменьшается, а коэффициент поверхностной диффузии адатомов увеличивается.

Размер критического зародыша и следовательно зернистость пленки сильно зависят от природы металла, для тугоплавких металлов (с высокой температурой кипения), таких как W, Mo, Ta, Pt и Ni, даже очень маленькие зародыши являются устойчивыми. У металлов с низкой температурой кипения, таких как Cd, Mg, и Zn, зародыши должны стать достаточно большими, прежде чем они станут устойчивыми, их устойчивость с увеличением размера растет очень медленно, диссоциация или повторное испарение при этом остаются вероятными. Критические зародыши должны иметь большие размеры, если поверхностная энергия конденсируемого материала велика, а материала подложки мала.

Чем сильнее связь между адатомами и подложкой, тем меньше критический зародыш и тем больше частота зародышеобразования.

Увеличение температуры подложки приведет к увеличению размера критического зародыша. Кроме того, островковая структура будет сохраняться до больших средних толщин, чем те, которые соответствуют низким температурам.

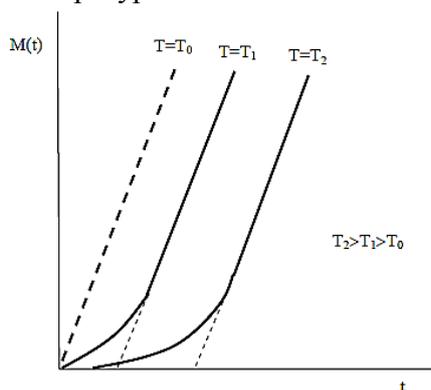


Рис. 5. Зависимость массы сконденсировавшегося вещества от времени при разных температурах подложки.

На примере получения пленок ВТСП ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$) показано влияние температуры и давления кислорода на получение конечной структуры и химического состава (рис. 6).

Подача газов. Важной отличительной особенностью метода ИЛО является возможность подачи газов - процесс осаждения пленок можно проводить в широком диапазоне давлений фонового газа, от глубокого вакуума, до давлений ~ 1 Торр. Это позволяет получать пленки из материалов, которые имеют высокое давление насыщенных паров некоторых элементов из их состава. За счет этого появляется возможность получать не только чистые материалы, но и оксиды и нитриды, полученные в процессе.

Расстояние подложка-мишень (H). Данный параметр имеет как положительное, так и отрицательное влияние. С одной стороны, чем ближе к мишени находится подложка, тем

больше частиц попадут на поверхность, следовательно будет выше скорость роста пленки (рис. 7). Но с другой стороны, за счет малого расстояния до подложки будут долетать более крупные частицы (капли), что ухудшает свойства пленки, создавая дефекты поверхности (рис. 8). Так для каждого отдельного материала, в зависимости от его свойств и выбранного для него режима работы лазера, необходимо подбирать оптимальное расстояние между подложкой и мишенью, соотнося требования по производительности и качеству поверхности.

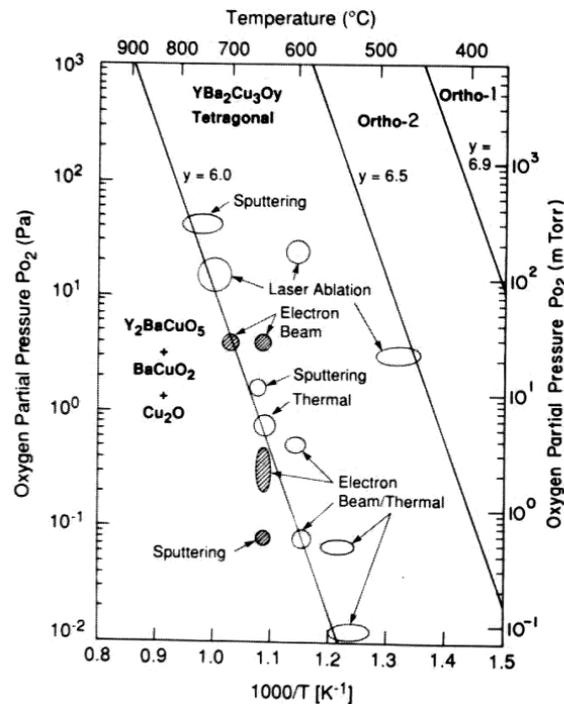
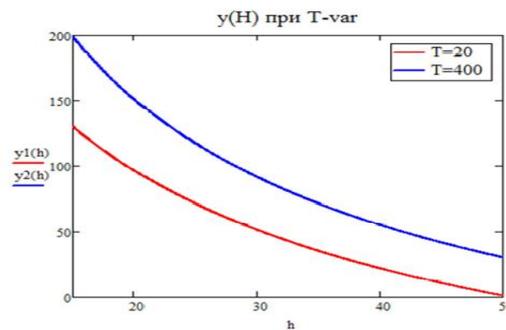


Рис. 6. Зависимость структуры и химического состава пленки оксида иттрия-бария-меди от температуры подложки и давления O_2 в камере.



Зависимость толщины от расстояния h при различных температурах

Рис. 7. График зависимости толщины осажденной пленки от расстояния h (за 25000 импульсов с энергией импульса $E=300$ мДж).

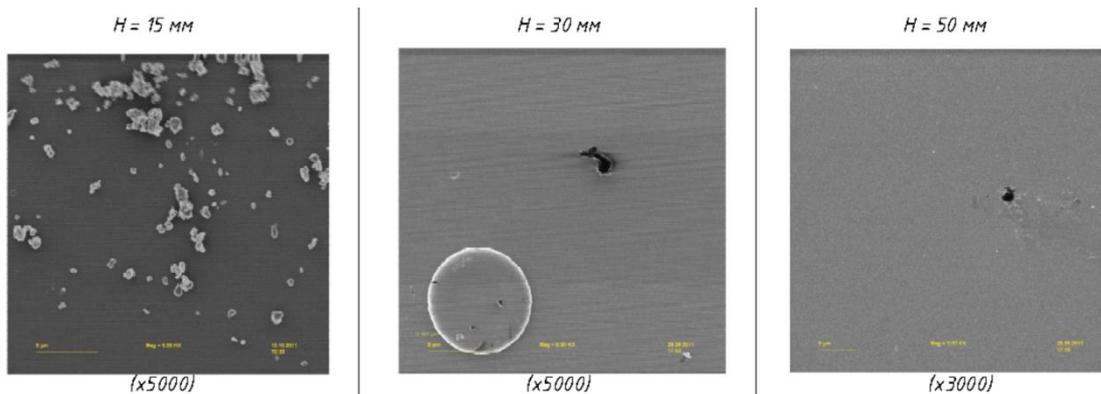


Рис. 8. Изображения поверхностей, полученные на АСМ-микроскопе. Осаждение производилось при расстоянии $H=15, 30$ и 50 мм.

Движение сканатора. Вращение подложки и мишени. Движение сканатора (по горизонтальной оси) в сочетании с вращением мишени обеспечивает равномерное использование материала мишени по всей ее площади (размер может меняться, и в соответствии с размером мишени задается траектория движения луча). При добавлении вращательного движения подложки можно обеспечить равномерное осаждение пленки по всей поверхности подложки.

Заключение

Исследование влияния технологических параметров процесса импульсного лазерного осаждения на свойства тонких пленок проводилось с использованием лабораторной нанотехнологической установки НаноФАБ-100. Данная установка интересна широкими технологическими возможностями. Наиболее важными управляемыми технологическими параметрами являются режимы лазерного излучения, температура подложки, расстояние между подложкой и мишенью, подача газов и движение сканатора, мишени и подложки.

Энергетические параметры лазерного излучения выбираются исходя из свойств материалов.

Нагрев подложки ускоряет и усиливает процессы формирования пленки, также при повышении температуры формируется более крупнозернистая структура (при определенной температуре возможен эпитаксиальный рост пленки).

Подача газов в процессе осаждения позволяет получать пленки из материалов, которые имеют высокое давление насыщенных паров некоторых элементов из их состава.

При приближении подложки к мишени увеличивается скорость осаждения, но повышается вероятность попадания капель на поверхность пленки.

Совместное движение сканатора, мишени и подложки обеспечивает равномерное нанесение пленки на всю поверхность подложки, при этом обеспечивается равномерное использование мишени.

Литература

1. Григорьянц А. Г., Мисюрин А. И., Шупенев А. Е. «Анализ поверхности тонких пленок Bi_2Te_3 осажденных методом импульсной лазерной абляции»// Наука и образование. – 2011. - #10, 77-30569/239713
2. В.Е. Черковец, С.А. Казаков, В.Г. Наумов «Лазерная техника для физических исследований и практических применений» МИФИ, Москва, 2006.
3. «Модуль PLD. Руководство пользователя» ИТ-МДТ, Москва, 2009.
4. «User manual COMPex Pro series» LAMBDA Physik, 2004.
5. Н.В. Лисицына «Экимерные лазеры» МГТУ, Москва, 2006.

6. В.Г.Дубровский «Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур» учебное пособие. Санкт — Петербург, 2006.

УДК 621.375.826

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ КОБАЛЬТОВЫХ СПЛАВОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Анастасия Руслановна Нигай⁽¹⁾, Алеся Константиновна Шелестова⁽²⁾

студентка 3 курса⁽¹⁾, магистр 1 года⁽²⁾

кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Р.С. Третьяков

кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

Введение

Развитие технологий нанесения покрытий происходит одновременно с развитием многих отраслей машиностроения. Предъявление высоких требований к деталям, работающим в агрессивных условиях, приводит технологов к все более трудным задачам восстановления деталей и создания функциональных покрытий. Одним из мало изученных направлений в технологиях наплавки и напыления является нанесение покрытий из кобальтовых сплавов и изучение их свойств.

Интерес к сплавам на основе кобальта возник в начале XX века. Сплавы системы Co-Cr и Co-Cr-W, созданные Элвудом Хэйном в 1910 году (Elwood Haynes, США), получили название Стеллиты (Stellite) и нашли широкое применение при изготовлении высокоскоростного режущего инструмента [1,2]. Позже были созданы литейные сплавы системы Co-Cr-Mo (Vitallium) и Co-Ni-Cr-W (X-40) и деформируемый сплав системы Co-Ni-Cr (S-816). Современные сплавы на кобальтовой основе, в том числе используемые для создания покрытий, базируются на вышеперечисленных системах. Существует множество кобальтовых сплавов с различным содержанием легирующих элементов: Ni, Fe, Al, B, C, Cr, Mn, Mo, P, S, Si, Ti, W, Zr, Nb, Ta. Влияние основных легирующих элементов на свойства кобальтовых сплавов приведено в таблице 1.

Кобальтовые сплавы выделяют по разным критериям: по химическому составу, по наличию конкретных упрочняющих фаз (карбидные и интерметаллидные), по содержанию какого-либо конкретного элемента (например, углерода) [3,4]. Наиболее удобной является классификация кобальтовых сплавов по химическому составу, поэтому разделим их на следующие функциональные группы (Таблица 2) [3]:

7. Износостойкие,
8. Жаропрочные,
9. Коррозионностойкие,
10. С интерметаллидным упрочнением.

Эта классификация является условной, и многие сплавы на кобальтовой основе могут быть включены сразу в несколько групп. Это и является их главным преимуществом, позволяющим использовать лишь один сплав для создания покрытия с требуемыми свойствами.

Таблица 1. Действие легирующих элементов в кобальтовых сплавах [1]

Элемент, %	Ni	Cr	W	Ti, Zr, Nb, Ta	Mo	C
Основное	Стабили-	Стабилизация	Твердо-	Образование	Повышение	Образование

действие	защита аустенита	поверхности и карбидообразование	растворное упрочнение	монокарбидов WC	пластичности	карбидов
Проблема*	Снижение коррозионной стойкости	Образование т.п.у.** - фаз	Образование т.п.у.** - фаз	Ухудшение стойкости поверхности	Уменьшение температур ликвидуса и солидуса	Снижение пластичности
Примеры сплавов						
X-40	10	25	7,5	-	-	0,45
Mar-M509	10	24	7	3,5 Ta	-	0,6
				0,5 Zr		
				0,2 Ti		
L-605	10	20	15	-	-	0,1
HS-188	22	22	14	-	-	0,08
Stellite 6	<2	28,5	4,6	-	<1	1,2
Stellite F	22	26	12,5	-	<1	1,8
Tribaloy T-400	<1,5	8,5	-	-	29	<0,08

*если введен в чрезмерном виде

** т.п.у. – топологически плотно упакованные фазы

Таблица 2. Содержание легирующих элементов в кобальтовых сплавах различных функциональных групп

Элемент, %	Co	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Si	Mn	N
Износостойкие	Основа	25-30	2-15	0,25-3,3	0-3	0-1	0-3	0-2	0-1	-
Жаропрочные	Основа	20-23	7-15	0,1-0,6	10-22	-	0-3	-	-	-
Коррозионностойкие	Основа	20-25	2	0-0,8	9-35	5-10	0-3	-	-	0-0,1
С интерметаллидным упрочнением	Основа	8-18	-	0-0,2	0-16	22-30	0-1,5	1-4	-	-

1. Виды кобальтовых сплавов и их свойства

1.1. Износостойкие кобальтовые сплавы

Износостойкие кобальтовые сплавы относятся к системе Co-Cr-W, причем содержание Cr в сплавах этой группы является наибольшим по сравнению с другими, так как он имеет ключевое значение в образовании карбидов с различным соотношением Cr/C.

Кобальтовые сплавы обладают превосходной сопротивляемостью к таким видам износа, как: абразивный, износ при трении скольжения и эрозийный износ. Почти все сплавы Stellite в большей или меньшей степени обладают такими свойствами в коррозионных средах и при повышенных температурах работы деталей. Низкоуглеродистые сплавы рекомендуют для использования в условиях кавитации, износа от трения скольжения или умеренного истирания. Сплавы с более высоким содержанием углерода, как правило, выбирают для использования в условиях абразивного износа, сильного истирания или эрозии. Содержание углерода в таких сплавах может достигать 3,3%. Для использования высокоуглеродистого сплава необходимо тщательно подбирать режимы обработки, так как в некоторых случаях могут образовываться

вторичные карбиды, понижающие пластичность сплава при высоких температурах (>650 °С). Собственно, поэтому диапазон рабочих температур сплавов этой группы ограничен производителем Kennametal Stellite™ (315-600 °С) [3, 5].

Сплав Stellite 6 (российский аналог ПР-К60Х30ВС или В3К) сочетает в себе все вышеперечисленные свойства, поэтому он довольно популярен в промышленных применениях [5]. Существуют различные модификации сплава Stellite 6: LC, HC, PM [6]. Они отличаются содержанием углерода и других элементов, присутствующих в сплаве Stellite 6 в небольшом количестве, но имеющих важное значение, а также добавлением других элементов. Например, сплав Stellite 6PM отличается от базового сплава добавлением бора, который придает сплаву дополнительную прочность, а также добавляет ему пластичность [1], тем самым нейтрализуя отрицательное действие углерода.

Применение износостойких сплавов Stellite весьма разнообразное: от аэрокосмических подшипников до зубьев промышленных пил [4]. Сплав Stellite 6 хорошо изучен и успешно применяется для наплавки деталей запорной арматуры [7], в частности на уплотнительные поверхности клапанов [8].

1.2. Жаропрочные кобальтовые сплавы

Кобальтовые сплавы имеют более высокую температуру плавления, чем сплавы на основе никеля и железа. Температура, при которой жаропрочные кобальтовые сплавы могут сохранять свои свойства достигает 1100 °С, при этом предел длительной прочности равен 70 МПа [7]. Такие сплавы обладают превосходной стойкостью к сульфидации.

Стойкость к высоким температурам кобальтовым сплавам добавляет высокое содержание вольфрама и никеля. Вольфрам – единственный элемент из всех легирующих добавок, который повышает температуру плавления кобальтовых сплавов, а присутствие большого содержания никеля позволяет сохранять стабильную аустенитную структуру гранцентрированной кубической решетки (г.ц.к.) кобальтовой матрицы при повышенных температурах и исключает ее превращение в структуру гексагональной плотноупакованной решетки (г.п.) при низких температурах. Что предоставляет возможность применение таких сплавов в циклических условиях знакопеременных температур.

Также жаропрочность кобальтовых сплавов обусловлена гомогенностью микроструктуры и низким содержанием углерода, который намного снижает их температуру плавления [1,3].

Примерами жаропрочных кобальтовых сплавов являются Stellite 25, Haynes 25, Haynes 188, Mar-M 509.

Сплав Haynes 25 обладает лучшей стойкостью к окислению по сравнению с широко применяемым сплавом на никелевой основе HastelloyX [9]. Ресурс работы таких сплавов ограничен ввиду их относительно невысоких показателей жаростойкости при температурах выше 1150 °С [10].

1.3. Коррозионностойкие кобальтовые сплавы

Коррозионностойкие кобальтовые сплавы так же, как и износостойкие можно разделить на две категории: низкоуглеродистые (0,025 — 0,15% углерода) и высокоуглеродистые (1 - >3% углерода). Сплавы с малым содержанием углерода (ULTIMET и Stellite 21) применимы в условиях работы деталей с высокими температурами или в тех условиях, где роль пластичности материала весьма существенна. Сплавы, принадлежащие ко второй категории (были рассмотрены в п.1.1), обеспечивают износостойкость при небольших нагрузках, но они не обладают хорошей пластичностью по сравнению с низкоуглеродистыми сплавами. Покрытия из низкоуглеродистых кобальтовых сплавов мало изучены по сравнению с высокоуглеродистыми.

По химическому составу коррозионностойкие кобальтовые сплавы отличаются от предыдущих групп малым содержанием вольфрама, а в некоторых сплавах и вовсе его отсутствием. Вместо вольфрама в эти сплавы добавляют молибден, который повышает характеристики пластичности при повышенных температурах, сохраняя при этом прочность. В значительном количестве добавляют никель (до 35 %), который защищает от действия

минеральных кислот и от коррозионного растрескивания деталей [4]. Ключевую роль в коррозионной стойкости играет большое содержание Cr в большинстве кобальтовых сплавов.

1.4. Сплавы с интерметаллидным упрочнением

В особую группу следует выделить сплавы Tribalou на кобальтовой основе. Также их еще называют сплавами с фазами Лавеса [4]. Эти сплавы характеризуются полным отсутствием вольфрама и большим содержанием молибдена (22 — 29%), отличающим эти сплавы от других групп кобальтовых сплавов. Их используют в особо тяжелых условиях работы (коррозионная среда и высокие температуры). Рабочая температура может находиться в диапазоне 800 — 1000 °C [5].

Фазы Лавеса - прочные интерметаллидные фазы, которые выделяются в кобальтовых сплавах вследствие добавления в них молибдена и кремния. Содержание углерода в сплавах серии Tribalou минимально возможное, поскольку большое количество карбидных выделений в сочетании с наличием фаз Лавеса может привести к охрупчиванию материала.

2. Типы кобальтовых присадочных материалов

Для нанесения покрытий из кобальтовых сплавов используют различные виды присадочных материалов: прутки, электроды, порошковые проволоки и порошки. Использование прутков (аргонодуговая наплавка и наплавка ацетиленкислородным способом) и электродов (ручная дуговая наплавка) позволяет наносить широкий наплавленный слой за один проход (диаметр прутков может быть до 8 мм, а электродов до 6,4 мм). Наплавка с использованием порошковой проволоки (в среде защитного газа и под флюсом) достаточно производительна, но доля основного материала в наплавленном слое составляет 30-60%, что может значительно снизить эксплуатационные свойства наплавленного сплава [7]. Применение порошка в качестве присадочного материала расширяет возможности технологий наплавки и напыления. Во-первых, существует огромный ассортимент порошковых кобальтовых сплавов, во-вторых, использование порошкового материала расширяет диапазон размеров наносимого покрытия, позволяет создавать покрытия на деталях любой конфигурации и управлять конечными эксплуатационными свойствами.

В настоящее время передовыми технологиями, используемыми для нанесения покрытий из кобальтовых сплавов, являются плазменно-порошковая наплавка и лазерная порошковая наплавка. Обе технологии обеспечивают малое перемешивание основного металла с наплавленным. Плазменно-порошковая наплавка зарекомендовала себя как технология, позволяющая создавать качественные покрытия из сплавов на кобальтовой основе, и широко применяется в арматуростроении. В то же время, использование лазера в качестве источника позволяет увеличить скорость наплавки до 12 раз по сравнению с плазменной наплавкой [11, 12, 13]. Увеличение скорости наплавки приводит к минимальному термическому влиянию на наплаваемый объект, что обеспечивает максимальное сохранение свойств исходного наплаваемого сплава. Например, некоторых случаях, увеличение скорости наплавки влияет на полученную структуру положительно: происходит измельчение микроструктуры и повышение показателей микротвердости. В работе [14] показано, что для износостойких кобальтовых сплавов (Stellite 6 и 12) при постоянных значениях комбинированного параметра погонной энергии ($P/V=0,12$) увеличение скорости ведет к увеличению микроструктуры, а при постоянных значениях комбинированного параметра погонного расхода порошка ($F/V=0,05$) – к уменьшению.

3. Исследование покрытий, полученных многослойной лазерной газопорошковой наплавкой кобальтовыми сплавами

Из вышесказанного можно сказать, что существует необходимость отработки технологии лазерной газопорошковой наплавки с использованием различных кобальтовых сплавов.

Для проведения эксперимента было использовано следующее оборудование: иттербиевый волоконный лазер ЛС-4, порошковый питатель GTV, наплавочная головка Precitec UC-50, совмещающая в себе функцию фокусировки лазерного излучения на поверхности детали с коаксиальной подачей порошка в зону обработки, и смеситель порошков «Вибротехник».

Образцы подготавливались на металлографическом оборудовании фирмы Struers. На отрезном станке Discotom-5 образцы были отрезаны в поперечном сечении валков, запрессованы в термоактивную смолу в автоматическом прессе Citopress-20 и отполированы на шлифовально-полировальном станке Tegamin-20.

Порошковые материалы Stellite 6 и Stellite 12 (таблица 3) наносились тремя слоями на подложки из стали Ст3 толщиной 10 мм.

Таблица 3. Химические составы присадочных материалов (процент по массе)

Марка порошка	C	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Stellite 6	1,31	1,1	29,1	0,2	1,5	BAL	1,6	0,6	4,2
Stellite 12	1,3	1,2	28,1	-	0,4	BAL	0,9	-	7,8

Качественные покрытия без трещин и пор, с наименьшим перемешиванием с подложкой и с оптимальными геометрическими размерами были получены на режимах, показанных в таблице 4. Внешний вид покрытия из сплава Stellite 6 показан на рисунке 1 и покрытия из сплава Stellite 12 – на рисунке 2.

Таблица 4. Режимы наплавки

Сплав	P, кВт	V, м/мин	F, об/мин	P/V	F/V	Шаг, мм
Stellite 6	1.0	10	0,50	-	0,05	1,5
Stellite 12	0.9	7,6	0,2	0.12	-	1,5

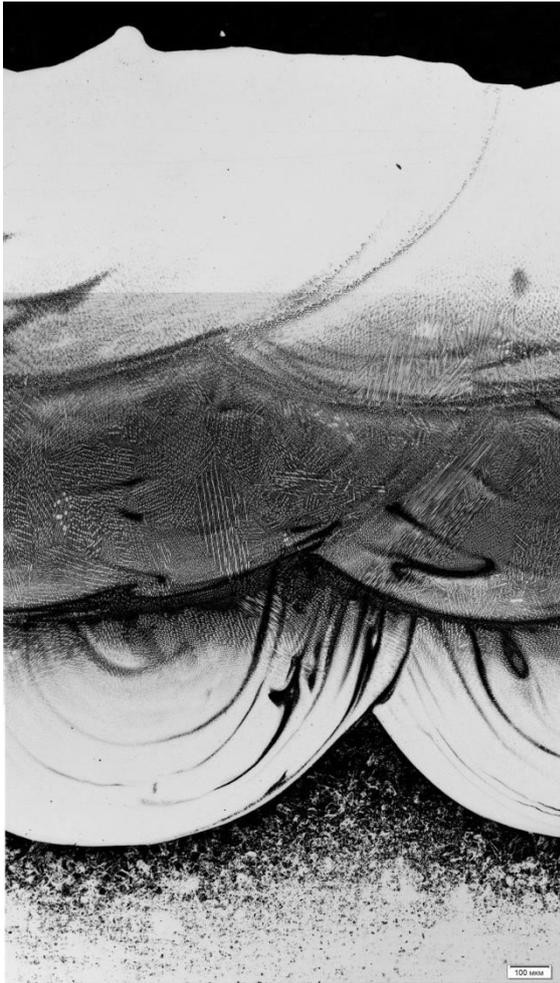


Рис. 1. Внешний вид покрытия из сплава Stellite 6, состоящего из трех слоев



Рис. 2. Внешний вид покрытия из сплава Stellite 12, состоящего из трех слоев

4. Выводы

Литературный анализ показал, что существует большое разнообразие кобальтовых сплавов, в том числе и порошковых. Они отличаются по своему функциональному назначению (износостойкие, жаропрочные, коррозионностойкие, интерметаллидным упрочнением) и по типу упрочнения (карбидное и интерметаллидное).

Использование порошковых материалов в качестве присадочных является наиболее перспективным для создания покрытий из кобальтовых сплавов, а применение метода лазерной газопорошковой наплавки позволяет создавать качественные многослойные покрытия из износостойких кобальтовых сплавов.

Литература

1. Под ред. *Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля*. Суперсплавы. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / пер. с англ. в 2-х книгах. кн. 1, 2 / под ред. *Р.Е. Шалина*. М.: Металлургия, 1995. 384 с.
2. URL:http://www.krugosvet.ru/enc/наука_i_tehnika/tehnologiya_i_promyshlennost/HENS_ELVUD.html
3. URL: <http://www.aerodynealloys.com/products/cobalt/about.php>
4. Nickel, cobalt and their alloys: ASM specialty handbook/ edited by J.R.Davis. - USA: ASM International, 2000. - 422 p.

5. URL: <http://www.stellite.com/Portals/0/HARDFACING%20ALLOYS%20-%20RUSSIAN.pdf>
6. URL: <http://www.matweb.com>
7. *Е.Ф. Переплетчиков, И.А. Рябцев*, “Плазменно-порошковая наплавка деталей запорной арматуры различного назначения”, Технология производства, 2007. №49. с. 57 – 61
8. URL: http://www.researchgate.net/publication/233236274_Impact_Wear_Resistance_of_Stellite_6_Hardfaced_Valve_Seats_with_Laser_Cladding
9. URL: <http://www.hpalloy.com/alloys/descriptions/HAYNES25.html>
10. *Латышев В.Б.; Мусеев С.А.; Каблов Е.Н.* Пат. 2164959 РФ, МПК С22С19/05. Жаропрочный сплав на основе кобальта и изделие, выполненное из этого сплава /; Государственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов". - № 99117973/02; заявл. 09.08.1999; опубл. 10.04.2001.
11. *W.C. Lin, C. Chen*, “Characteristics of thin surface layers of cobalt-based alloys deposited by laser cladding”, Surface & Coatings Technology, 2004. №200. P. 4557 – 4563
12. *E. Díaz, J.M. Amado, J. Montero, M.J. Tobar, A. Yáñez*, “Comparative study of Co-based alloys in repairing low Cr-Mo steel components by laser cladding”, Physics Procedia, 2012. №39. P. 368 – 375
13. *Adriano Scheid, Ana Sofia Clímaco Monteiro de Oliveira*, “Analysis of PTA hardfacing with CoCrWC and CoCrMoSi alloys”, Soldag. Insp. Sro Paulo, 2013. №14. P. 322 – 328
14. *Третьяков П.С.* Технологические особенности процесса лазерной модификации поверхностей с коаксиальной подачей порошковых материалов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 158 с.

Секция XIII

Реновационные технологии

Председатель:

Ступников Владимир Петрович

доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Реновационные технологии» (МТ-13), МГТУ
им. Н. Э. Баумана

Ученый секретарь:

Козлов Анатолий Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Реновационные технологии» (МТ-13) МГТУ им.
Н.Э.Баумана

УДК 621.791.927.5.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ СЕМЕЙСТВА ЯМЗ

Данила Владимирович Баранов

студент 5 курса

кафедра «Технологии обработки материалов»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: С.Н. Глазунов

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов»

Распределительный вал — основная деталь газораспределительного механизма (ГРМ) (рисунок 1, рисунок 2), служащая для синхронизации впуска или выпуска и тактов работы двигателя. Составной частью распределительного вала являются его кулачки, количество которых соответствует количеству впускных и выпускных клапанов двигателя. Таким образом, каждому клапану соответствует индивидуальный кулачок, который и открывает клапан, набегая на рычаг толкателя клапана. Когда кулачок «сбегает» с рычага, клапан закрывается под действием мощной возвратной пружины. Распределительный вал устанавливают в биметаллических (ЗМЗ, ЗИЛ) или металлокерамических (ЯМЗ) втулках.

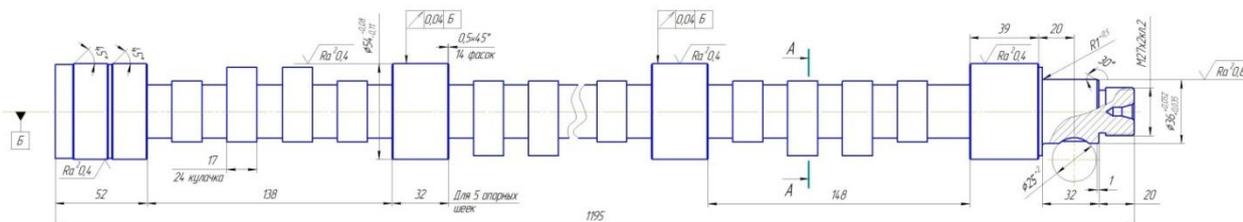


Рис.1. Чертеж распределительного вала двигателя ЯМЗ-240

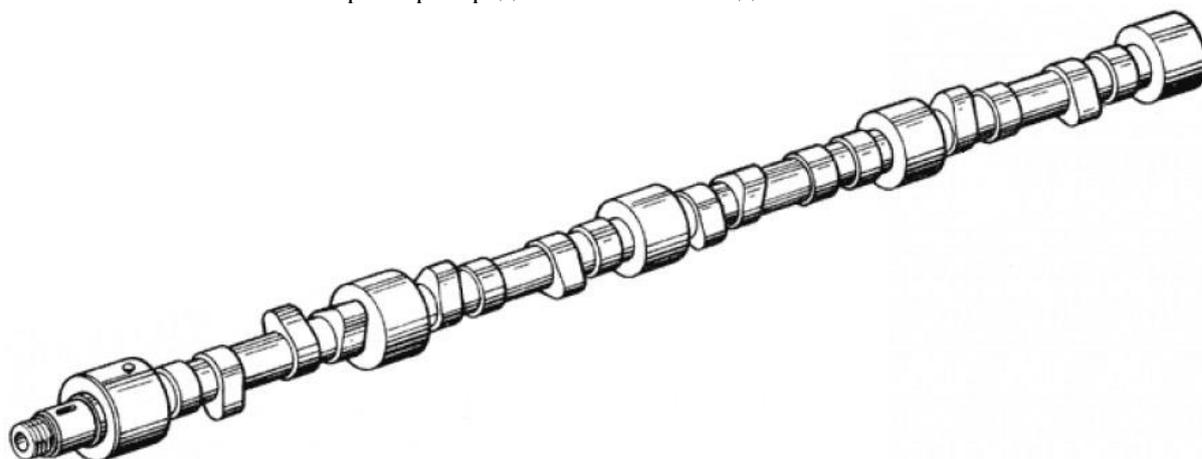


Рис.2. Вал распределительный двигателя ЯМЗ-240

Распределительный вал изготавливают штамповкой из углеродистых или легированных сталей.

В данном случае вал изготовлен из стали 45. Общие сведения о стали 45 приведены в таблицах 1,2,3 [5,13]

Таблица 1

Классификация
сталь конструкционная углеродистая качественная
Заменитель

стали: 40Х, 50, 50Г2
Вид поставки
Сортовой прокат, в том числе фасонный: ГОСТ 1050-74, ГОСТ 2590-71, ГОСТ 2591-71, ГОСТ 2879-69, ГОСТ 8509-86, ГОСТ 8510-86, ГОСТ 8239-72, ГОСТ 8240-72, ГОСТ 10702-78. Калиброванный пруток ГОСТ 1050-74, ГОСТ 7414-75, ГОСТ 8559-75, ГОСТ 8560-78, ГОСТ 10702-78. Лист толстый ГОСТ 1577-81, ГОСТ 19903-74. Лист тонкий ГОСТ 16523-70. Лента ГОСТ 2284-79. Полоса ГОСТ 1577-81, ГОСТ 103-76, ГОСТ 82-70. Проволока ГОСТ 17305-71, ГОСТ 5663-79. Поковки и кованые заготовки ГОСТ 8479-70, ГОСТ 1131-71. Трубы ГОСТ 8732-78, ГОСТ 8733-87, ГОСТ 8734-75, ГОСТ 8731-87, ГОСТ 21729-78.
Назначение
Вал-шестерни, коленчатые и распределительные валы, шестерни, шпиндели, бандажки, цилиндры, кулачки и другие нормализованные, улучшаемые и подвергаемые поверхностной термообработке детали, от которых требуется повышенная прочность.

Таблица 2

Химический состав	
Химический элемент	%
Кремний (Si)	0.17-0.37
Медь (Cu), не более	0.25
Мышьяк (As), не более	0.08
Марганец (Mn)	0.50-0.80
Никель (Ni), не более	0.25
Фосфор (P), не более	0.035
Хром (Cr), не более	0.25
Сера (S), не более	0.04

Таблица 3

Технологические свойства
Температура ковки
Начала 1250, конца 700. Сечения до 400 мм охлаждаются на воздухе.
Свариваемость
Трудносвариваемая. Способы сварки: РДС и КТС. Необходим подогрев и последующая термообработка.
Обрабатываемость резанием
В горячекатаном состоянии при HB 170-179 и $\sigma_B = 640$ МПа $K_{ц\text{ тв.спл.}} = 1$, $K_{ц\text{ б.ст.}} = 1$.
Склонность к отпускной способности
Не склонна.

Поверхности опорных шеек и кулачков вала подвергнуты закалке токами высокой частоты на глубину от 2 до 5 мм до твердости HRC 54—63. Ширина закаленной зоны цилиндрической части кулачка не менее 17 мм и расположена симметрично относительно кромок кулачка.

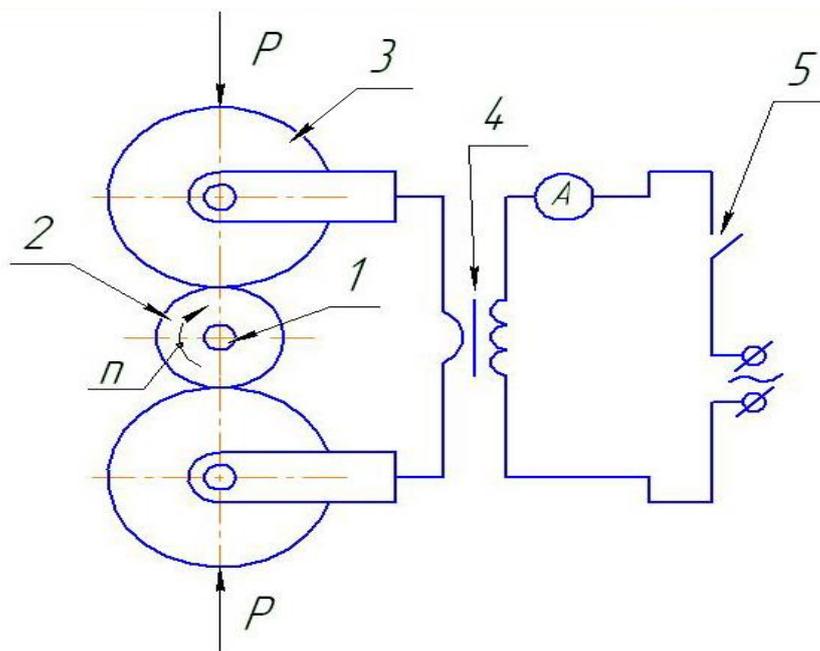
Необходимая твердость: опорных шеек - 55...63 HRC, кулачков - не менее 55 HRC.

В процессе эксплуатации на распределительный вал с конструктивно заложенной малой жесткостью воздействуют силы трения, вибрация, знакопеременные нагрузки, среда и др., вследствие чего возникают дефекты вала: износ кулачков, опорных шеек и увеличение прогиба. Износ кулачков распределительного вала по высоте вызывает более позднее открывание и

Электроконтактные способы восстановления деталей по сравнению с другими, рассмотренными выше способами имеют ряд преимуществ на этапе восстановления шеек распределительного вала. Среди них – высокая производительность и низкая энергоемкость процесса, незначительная зона термического влияния, отсутствие мощного светового излучения и газовыделений, снижение потерь присадочного материала в результате разбрызгивания и выгорания легирующих элементов, сохранение первоначальных свойств материала детали при высокой прочности получаемого покрытия с основным металлом. Причем для получения покрытий ЭКП можно использовать однокомпонентные порошки, применяемые для других способов наплавки, используемые в порошковой металлургии; порошковые смеси, которые могут быть двух- или многокомпонентными и состоять из различных металлических и неметаллических порошков; спеченные из порошков ленты, стальные ленты и проволоки; комбинированные материалы.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать выбор в пользу электроконтактных методов, в частности, метода электроконтактной приварки ленты, наиболее проработанного технологически.

Сущность способа: соединение основного и присадочного металла осуществляется в результате совместной пластической деформации, протекающей при прохождении импульсов тока и действии усилия сжатия. Схема электроконтактной приварки ленты представлена на рисунке 4.



- 1 – центрик;
2 – восстанавливаемая деталь;
3 – ролик;
4 – трансформатор;
5 – прерыватель тока;

Рис.4. Электроконтактная приварка ленты

Достоинства:

- отсутствие проплавления основного металла (зона термического влияния не превышает 0,5 мм);
- минимальные деформации наплавленных деталей;
- возможность наплавки слоёв малой толщины (0,2 – 1 мм);

- возможность получения наплавленного металла с любыми свойствами.

Недостатки:

- ограниченность толщины наплавленного слоя;
- сложность установки.

Электроконтактная приварка является эффективным способом получения на рабочих поверхностях деталей машин и механизмов слоев с необходимыми эксплуатационными свойствами [2,6]. Она осуществляется в твердой фазе за счёт деформирования присадочного материала и поверхностного слоя металла детали, нагретых проходящим током до пластичного состояния. Процесс приварки состоит из электромеханических циклов, включающих прижатие присадочного материала к поверхности детали и их совместный нагрев короткими импульсами тока (0,02 – 0,1 с) большой величины (до 20 кА). В результате действия одного такого цикла к поверхности детали приваривается единичная площадка. Сплошной слой металла на поверхности детали образуют в результате приварки единичных площадок с перекрытием соседних. Соединение приваренного слоя с основой, равнопрочное основному металлу, при ЭКП может быть получено при различных сочетаниях основных технологических параметров (силы тока, усилия сжатия электродов, длительности импульса). Схема электроконтактной приварки ленты представлена на рисунке 5.

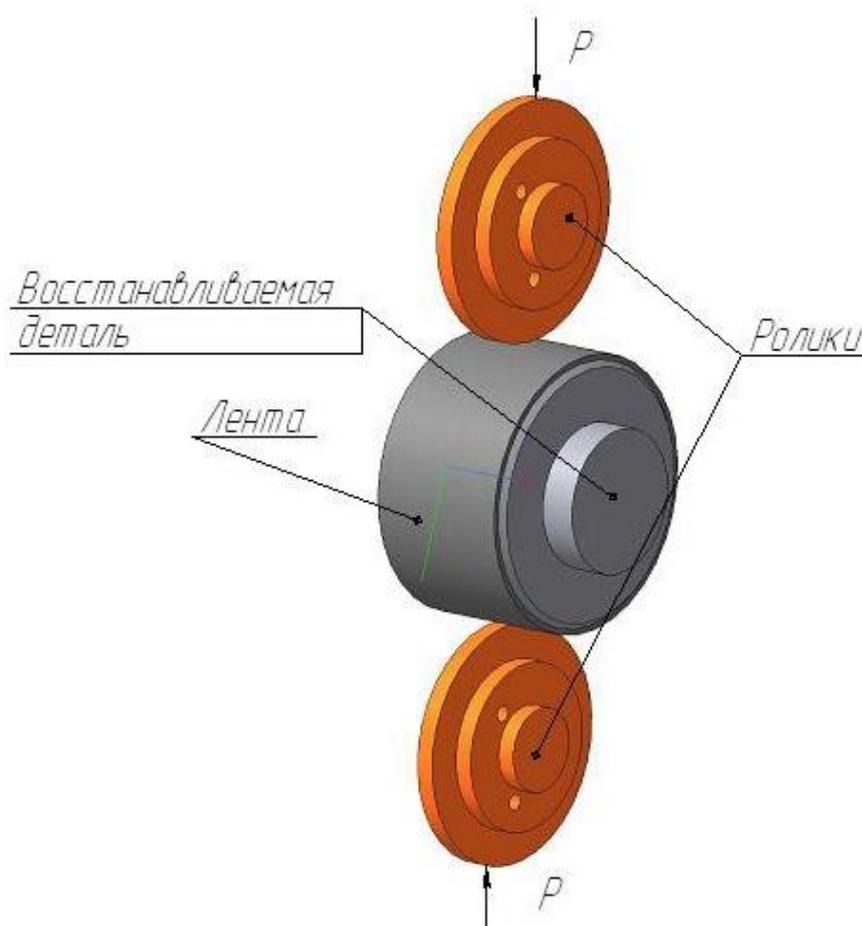


Рис.5. Схема электроконтактной приварки ленты

Электроконтактная приварка мерных заготовок из стальной ленты к поверхности восстанавливаемой детали осуществляют на модернизированной установке 011-1-02 «Ремдеталь» (рисунок 6).

Технология восстановления кулачков распредвала.

Распределительные валы работают в условиях знакопеременных нагрузок. Для их восстановления наиболее рационально применять порошковые твердые сплавы. Для

большинства кулачков требуется наплавить только верхушку. Однако при значительных износах кулачки наплавляют по профилю и затем шлифуют под номинальный размер.

Наиболее универсальными и совершенными методами нанесения защитных покрытий являются наплавка и напыление плазменной дугой.

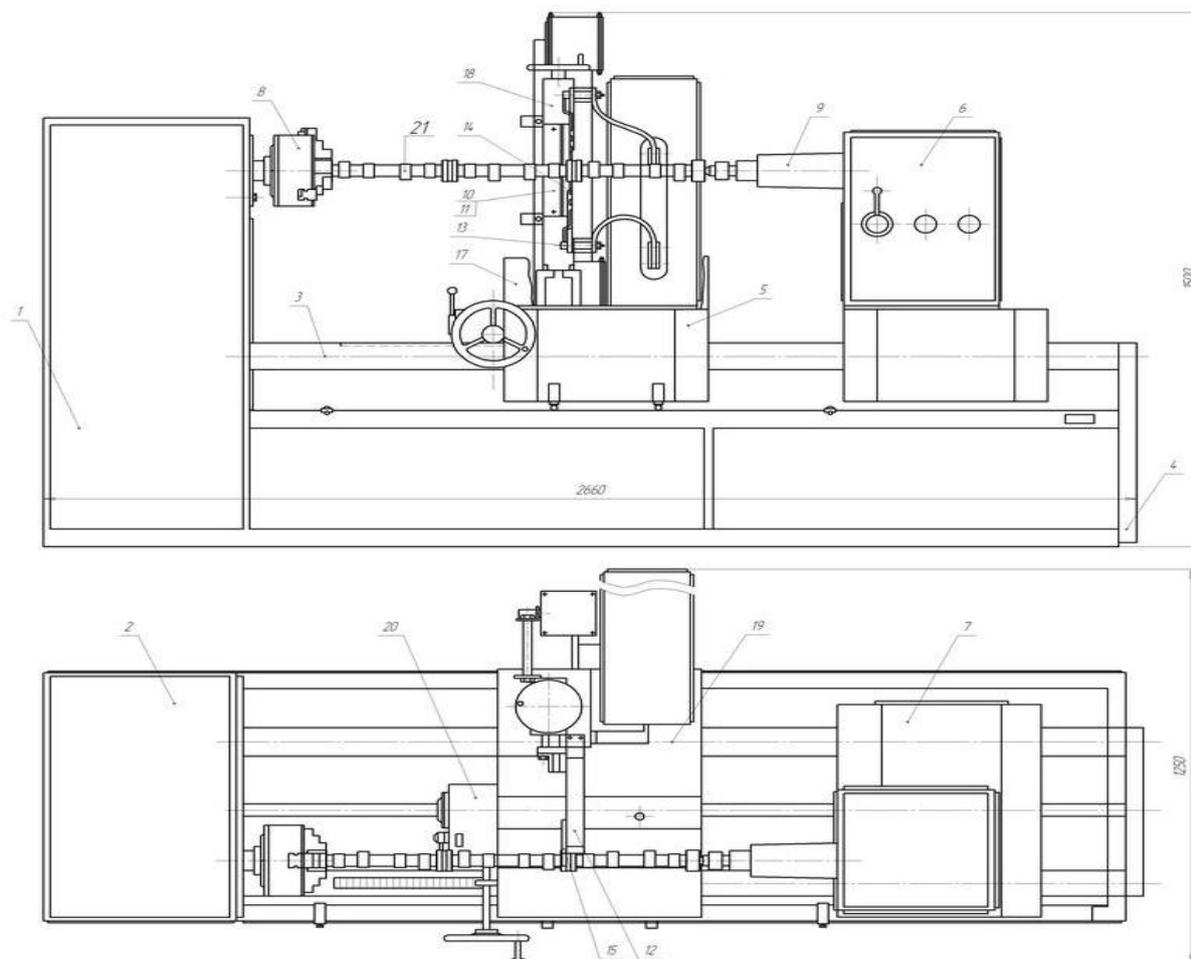


Рис.6. Установка 011-1-02 «Ремдеталь»

1 – электрошкаф; 2 – крышка; 3 – передняя направляющая; 4 – стойка; 5 – тележка; 6 – задняя бабка; 7 – тележка; 8 – патрон; 9 – пиноль; 10 – уголок; 11 – текстолитовая прокладка; 12 – клещевина; 13 – шестигранник; 14 – ролик; 15 – щека; 16 – рычаг; 17 – корыто; 18 – штатив; 19 – задняя направляющая; 20 – редуктор подачи; 21 – восстанавливаемая деталь.

В последнее время наиболее активно внедряют технологию плазменной наплавки проволочными и порошковыми материалами. В связи с широкой универсальностью использования различной гаммы выпускаемых присадочных порошков процесс плазменной наплавки порошковыми материалами наиболее эффективен.

Преимущества методов плазменного нанесения покрытий перед другими на этапе восстановления кулачков распредвала заключаются в следующем:

1. высокая температура плазменного потока позволяет расплавлять и наносить самые тугоплавкие материалы;

2. поток плазмы дает возможность получать сплавы различных по свойствам материалов или наносить многослойные покрытия из различных сплавов. Это открывает широкую возможность получения покрытий, сочетающих разнообразные защитные свойства;

3. возможности этого способа не ограничены формой и размерами обрабатываемого изделия;

4. плазменная дуга – наиболее гибкий источник нагрева, позволяющий в широких пределах регулировать его энергетические характеристики.

5. этот способ позволяет получить тонкий равномерный слой покрытия с гладкой беспористой поверхностью.

6. высокая концентрация тепловой мощности и минимальная ширина зоны термического влияния.

7. возможность получения толщины наплавляемого слоя от 0,1 мм до нескольких миллиметров.

8. возможность наплавления различных износостойких материалов (медь, латунь, пластмасса) на стальную деталь.

9. возможность выполнения плазменной закалки поверхности детали.

10. относительно высокий КПД дуги (0.2 ... 0.45).

11. малое (по сравнению с другими видами наплавки) перемешивание наплавляемого материала с основой, что позволяет достичь необходимых характеристик покрытий.

В настоящее время среди методов *порошковой плазменной наплавки* наиболее активно используется метод порошковой плазменной наплавки, получивший название *РТА - процесс* (plasma transferred arc). При этом методе действуют одновременно основная дуга (горящая между электродом и изделием) и косвенная или пилотная дуга (горящая внутри плазматрона между электродом и плазмообразующим соплом). В связи с тем, что процесс нанесения покрытий только косвенной плазменной дугой в России называется *плазменным напылением*, новая технология получила название *плазменная наплавка-напыление* [4,11].

Таким образом, процесс *плазменной наплавки-напыления* - это метод *нанесения порошковых покрытий* толщиной 0,5 - 4,0 мм с гибким регулированием ввода тепла в порошок и изделие плазматроном с двумя дугами - основной и пилотной.

Поскольку покрытия наносимые методом плазменного напыления ограничены толщиной порядка 1 мм, за пределами которой проявляется тенденция к отслаиванию (вследствие высоких внутренних напряжений), а покрытия, наносимые плазменной наплавкой традиционным способом с использованием только основной дуги связаны с большим проплавлением основного металла и его перемешиванием с присадочным материалом (соответственно, с отсутствием необходимых свойств покрытия в первом наплавленном слое), то данная технология плазменной наплавки-напыления относится к гибридным процессам, совмещающим положительные характеристики процессов наплавки и напыления.

Основные сравнительные характеристики плазменных процессов приведены в таблице 4 [4,11].

Таблица 4

Свойства покрытий, нанесенных различными методами			
Характеристика процессов	Плазменное напыление	Плазменная наплавка	ПНН (РТА-процесс)
Толщина покрытия, мм	$\leq 1,0$	слоями $\leq 4,0$	0,5-4,0
Пористость покрытия, %	≤ 10	отсутствует	отсутствует
Прочность сцепления покрытия, МПа	≤ 100	полное сплавление	полное сплавление
Растворение покрытия в основном металле, %	отсутствует	≤ 5	≤ 5
Температура детали в процессе нанесения покрытия, °С	≤ 150	≤ 700	≤ 700
Положение поверхности при нанесении покрытия	во всех положениях	в нижнем положении	во всех положениях

Процесс плазменной наплавки-напыления (РТА - процесс) обеспечивает использование пилотной (косвенной) дуги для расплавления присадочного порошка и основной дуги (переносимой) для поддержания необходимой температуры частиц порошка осажденной на детали. При этом увеличение времени нахождения частиц порошка при высокой температуре способствует максимальному сцеплению и уплотнению частиц с минимальным перегревом поверхности детали. Оптимизация основных характеристик процесса (токов основной и пилотной дуги, расстояния до изделия, скорости подачи порошка и скорости перемещения плазмотрона) выявило минимальную чувствительность к скорости подачи порошка и в определенных пределах к скорости перемещения плазмотрона.

В зависимости от компоновки различают:

1. Открытую плазменную струю (анодом является деталь или пруток). В этом случае происходит повышенный нагрев детали. Используется эта схема для резки металла и для нанесения покрытий.
2. Закрытую плазменную струю (анодом является сопло или канал горелки). Хотя температура сжатой дуги на 20 ...30% в этом случае выше, но интенсивность потока ниже, т. к. увеличивается теплоотдача в окружающую среду. Схема используется для закалки, металлизации и напыления порошков.
3. Комбинированная схема (анод подключается к детали и к соплу горелки). В этом случае горят две дуги. Схема используется при наплавке порошком.

Плазменную наплавку металла можно реализовать двумя способами:

1. Струя газа захватывает и подает порошок на поверхность детали;
2. В плазменную струю вводится присадочный материал в виде проволоки, прутка, ленты.

В качестве плазмообразующих газов можно использовать аргон, гелий, азот, кислород, водород и воздух. Наилучшие результаты наплавки получаются с аргоном и гелием.

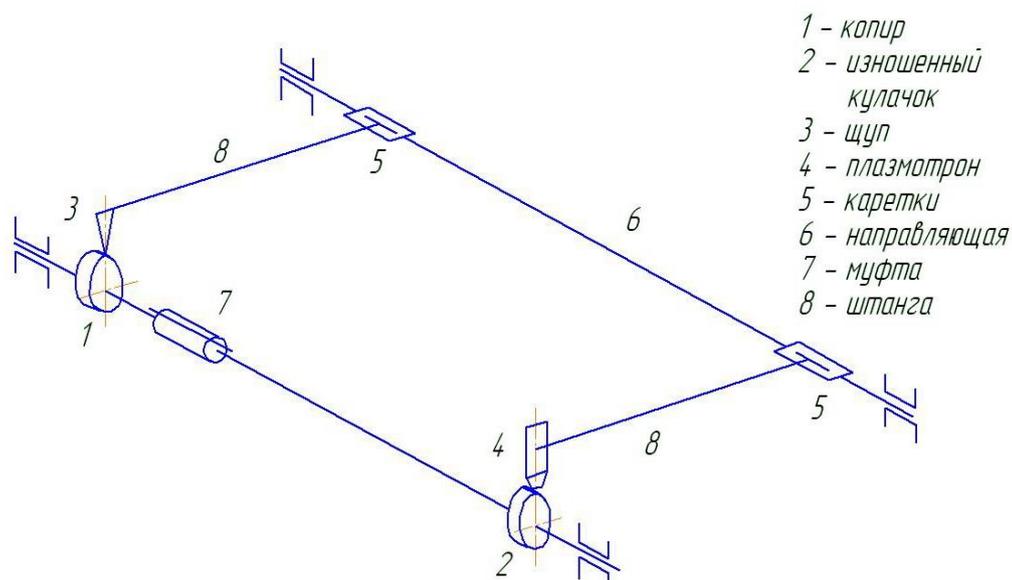


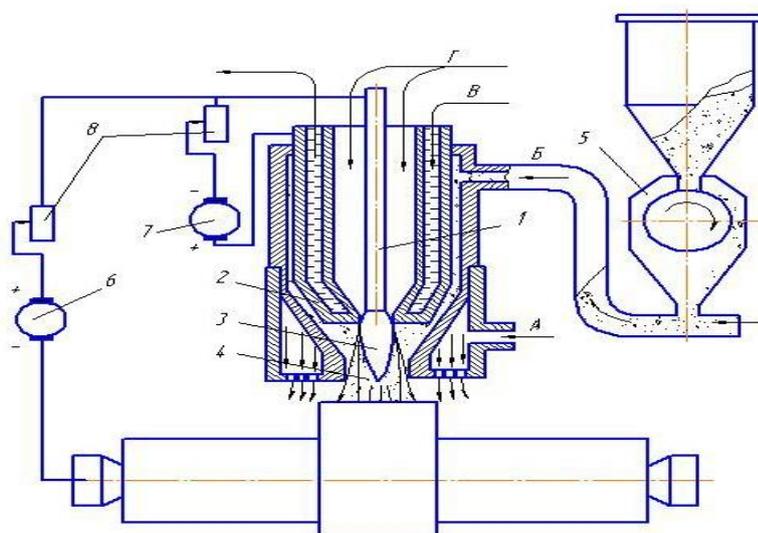
Рис.7. Схема копирующего устройства наплавочной установки

Кулачок распределительного вала в поперечном сечении представляет собой замкнутую поверхность с изменяющейся по контуру кривизной. Большая часть замкнутой поверхности представляет собой цилиндр, ось этого цилиндра является одновременно осью вращения для других кулачков и цилиндрических рабочих поверхностей распределительного вала. Совмещение поверхности изношенного кулачка по продольной оси и угловому расположению с эталонной поверхностью копира создаёт условие для применения механического

копировального устройства (рисунок 7), в котором управление движением плазмотрона осуществляется щупом. Копировальное устройство монтируется на токарном станке [4].

Зазора между соплом и наплавленной поверхностью в 2 мм и более создает, по нашему мнению, надёжное условие для предотвращения замыкания электрической цепи (в плазмотроне возникнет несанкционированная «дежурная» дуга, процесс наплавки прервётся).

Для плазменной наплавки наиболее широко применяется плазмотрон комбинированного действия (рисунок 8) [3,4,11,15].



- 1 - вольфрамовый электрод; 2 - сопло;
3 - плазменная струя косвенного действия; 4 - дуга прямого действия;
5 - питатель для подачи порошка;
6 - источник питания дуги прямого действия;
7 - источник питания дуги косвенного действия;
8 - балластные сопротивления;
А - подача защитного газа; Б - подача порошка;
В - подача охлаждающей воды; Г - подача плазмобразующего газа.

Рис.8. Схема плазмотрона комбинированного действия

При горении независимой дуги такого плазмотрона между вольфрамовым электродом и соплом происходит расплавление присадочного металлического порошка, а при горении дуги между электродом и изделием поверхность последнего нагревается, и обеспечивается сплавление присадочного и основного металла. Использование комбинированной плазменной дуги позволяет получить минимальную глубину проплавления и долю основного металла в составе наплавленного, что является важнейшим технологическим преимуществом плазменной наплавки по сравнению с другими способами наплавки.

Механическая обработка восстановленного распредела.

Точение закаленных сталей имеет ряд преимуществ по сравнению с шлифованием. При твердом точении в резании в каждый момент времени участвует одна точка режущей кромки, что позволяет легко обрабатывать сложные контуры без применения дорогостоящих профильных кругов, используемых при шлифовании. К тому же, твердое точение дает возможность обрабатывать сложные поверхности за один установ.

В результате обеспечивается превосходная точность позиционирования, сокращается число установов заготовки и снижается риск поломки детали. Процесс твердого точения также более благоприятен для окружающей среды, так как на данной операции не образуются абразивная пыль, как при шлифовании, и не требуется применение СОЖ.

В конечном счете, при твердом точении сокращаются затраты на обслуживание станка, упрощается управление технологическим процессом, а также обеспечиваются высокая

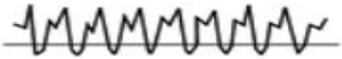
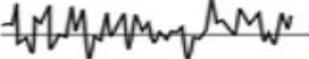
производительность и качество обработки. Благодаря всем этим преимуществам переход к твердому точению значительно сокращает расходы на производство.

Формирование поверхности (таблица 6).

При обработке закаленных сталей твердым точением качество получаемой поверхности выше, чем после шлифования[10].

После наплавки кулачки шлифуют на копировально-шлифовальном станке модели ХШЗ-57Ф2 в два приема.

Таблица 6.

		
	Точение	Шлифование
Метод формирования поверхности	Контакт одной точкой	Контакт множеством точек
Профиль	Периодический, однообразный	Хаотический, разнообразный
Остаточные напряжения	Сжатия (в основном)	Сжатия (в основном)
Профиль поверхности		

Станок шлифовальный ХШЗ-57Ф2 предназначен для шлифования профиля кулачков распределительных валов по полуавтоматическому циклу. Станок используется в условиях единичного, серийного и массового производства и оставляется налаженным на обработку конкретного распределительного вала.

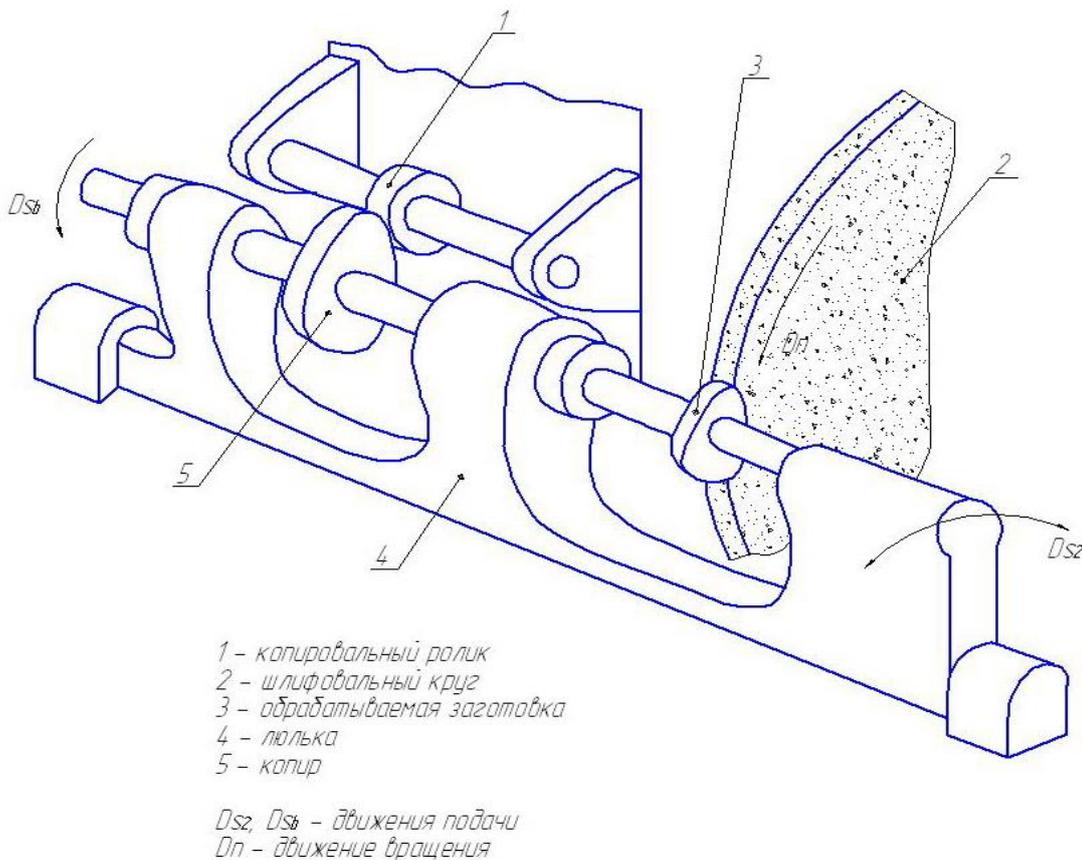


Рис.9. Схема шлифования кулачков

Переменная скорость вращения заготовки в течение одного оборота при шлифовании обеспечивает постоянство объема снимаемого металла. Замедление на участках подъема и

спуска профиля, а также ускорение на вершине кулачка позволяет повысить среднюю частоту вращения заготовки до близкого к оптимальному значению. Это повышает производительность и способствует бесприжоговому шлифованию.

Широкий диапазон скоростей подачи шлифовального круга и вращения изделия, возможность останова каждой подачи на фиксированную продолжительность времени, возможность включения правки шлифовального круга в любой момент цикла все это позволяет осуществлять любой цикл шлифования профиля кулачков.

Схема шлифования кулачков представлена на рисунке 9.

Заданный профиль кулачка образуется совокупным действием вращения и качания обрабатываемого распределительного вала, который установлен в центрах копировально-шлифовального станка с качающимся столом. Копиры 5, расположенные на передней бабке, поочередно вступают в контакт с копирным роликом 1, и при вращении шпинделя передней бабки осуществляется качательное движение стола по программе, задаваемой профилем копира. Согласование углового положения кулачков и копиров обеспечивается хомутиком.

Исследования рабочих характеристик распредела.

Исследования, проведенные в НИИТУВИД, ГНУ ГОСНИТИ, ФГОУ ВПО МГАУ приведены ниже.

Влияние параметров электроконтактной приварки на качество получаемого покрытия из металлической ленты показало, что влияние усилия сжатия на формирование покрытия и прочность соединения его с основой в рассмотренном интервале $P = 0,8...2,0$ кН имеет экстремальный характер с максимумом, причем максимальная прочность соединения при $P = 1,4$ кН. Поэтому исследование влияния других основных технологических параметров режима ЭКП ($I_{св}$ и $t_{и}$) на формирование покрытия и качество соединения его с основой проводили при $P = 1,4$ кН.

Влияние величины тока $I_{св}$ в импульсе и длительности его протекания $t_{и}$ на прочность соединения покрытия из стали 50ХФА со сталью 45 представлено на рисунке 10.

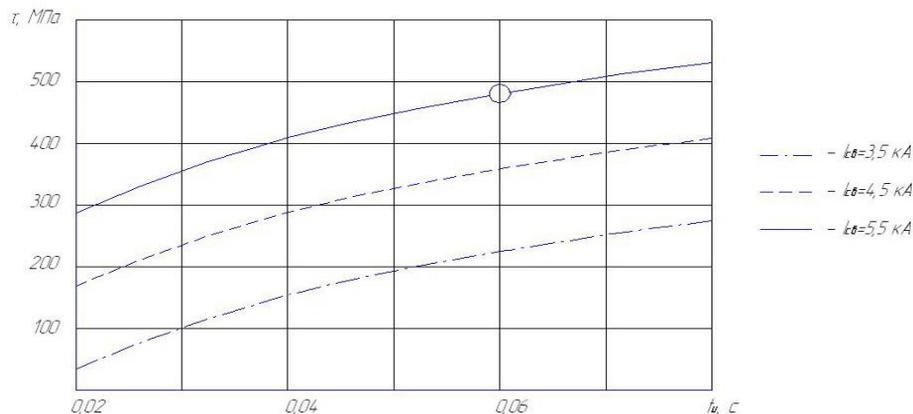


Рис. 10. Зависимость прочности соединения «сталь 45 – лента из стали 50ХФА» от силы тока и длительности его протекания при ЭКП ($P=1,4$ кН, $t_{и} = 0,08$ с)

Установлено, что при значениях $I_{св} = 3,5-4,5$ кА увеличение $t_{и}$ в исследованном интервале не позволяет получать равнопрочные с основным материалом соединения. Увеличение $I_{св}$ при фиксированных значениях $t_{и}$ приводит к интенсивному увеличению прочности соединения покрытия с основой. Причем соединения, полученные при $I_{св} = 5,5$ кА и $t_{и} = 0,06...0,08$ с, равнопрочны основному металлу, так как в этом случае в зоне соединения выделяется достаточное количество теплоты для образования высокопрочного соединения покрытия с основой. Следует отметить, что при $I_{св} = 5,5$ кА и $t_{и} = 0,08$ с происходит подплавление центральной части зоны контакта, приводящее к выплескам жидкой фазы из зоны соединения и снижению качества получаемого покрытия.

Поэтому в качестве оптимального режима ЭКП ленты из стали 50ХФА на сталь 45 был выбран следующий: $P = 1,4 \text{ кН}$, $I_{\text{св}} = 5,5 \text{ кА}$, $t_{\text{и}} = 0,06 \text{ с}$, $t_{\text{п}} = 0,08 \text{ с}$.

Из результатов испытаний на микротвердость (рисунок 11) следует, что в результате электроконтактной приварки ленты из стали 50ХФА имеют место небольшая протяженность (глубина) зоны соединения и относительно небольшая глубина ЗТВ. Кроме того, микротвердость зоны соединения покрытие из стали 50ХФА-сталь 45 находится в требуемом диапазоне 54...63 HRC.

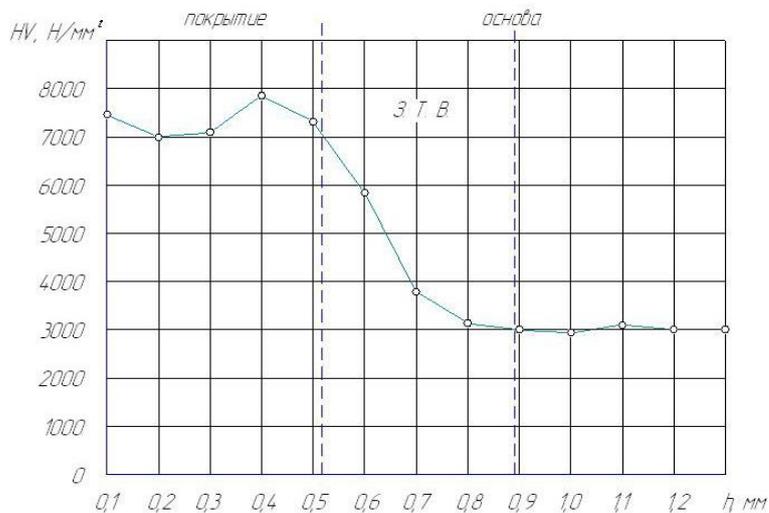


Рис.11. Микротвердость зоны соединения «лента из стали 50ХФА – сталь 45»

Из проведенных испытаний на износостойкость установлено (рисунок 12), что износостойкость покрытия из стали 50ХФА, полученного ЭКП, приблизительно в 2,5...2,8 раза выше износостойкости стали 45 в исходном состоянии и в 1,5...1,7 раза выше износостойкости той же стали, термообработанной до HRC 49...52 [3,16].

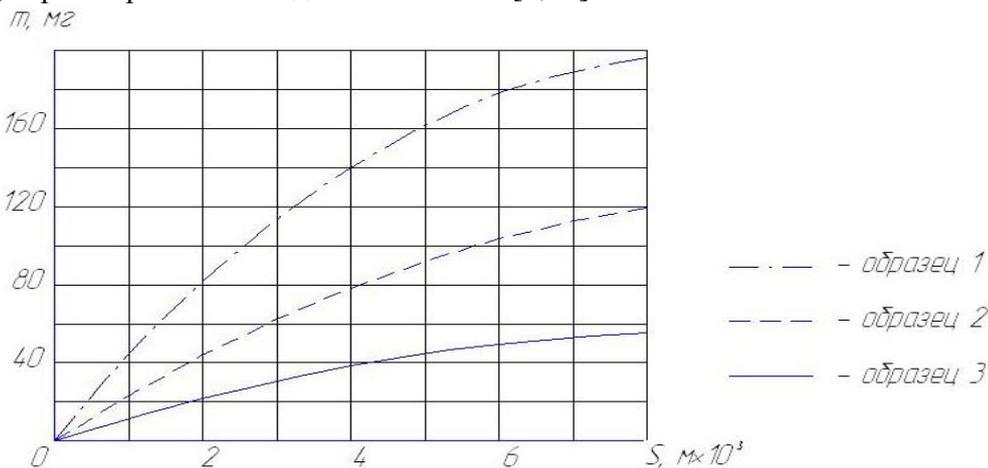


Рис.12. Результаты испытаний износостойкости образцов

образец 1 – сталь 45, образец 2 – сталь 45 закаленная до HRC 49...52, образец 3 – сталь 45 с покрытием из ленты 50ХФА.

При анализе микроструктуры самофлюсующихся покрытий, нанесенных методом плазменной наплавки-напыления, было отмечено получение литой структуры (в отличие от слоистой структуры, типичной для процессов плазменного напыления), а также отсутствие пористости (около 0,3 %). Микротвердость покрытия составила HV 800. Зона термического влияния зафиксирована порядка 0,5 мм, в то время как при плазменной наплавке она составляет около 3-4 мм.

Выводы:

- 1) В данной работе описана технология восстановления распределительного вала двигателя семейства ЯМЗ-240.
- 2) В работе проведен анализ характерных дефектов распределительного вала двигателя семейства ЯМЗ-240. После анализа было определено, что износ опорных шеек и кулачков вала являются самыми распространенными дефектами.
- 3) В ходе анализа возможных способов восстановления заданной детали был определен наилучший как с технической, так и с экономической точки зрения.
- 4) В ходе анализа имеющегося оборудования было выбрано наиболее подходящее (по техническим и экономическим характеристикам).
- 5) Разработана технология восстановления распределительного вала двигателя семейства ЯМЗ-240

Литература

1. Аршинов В.Д., Зорин В.К., Созинов Г.И. Ремонт двигателей ЯМЗ-240, ЯМЗ-240Н, ЯМЗ-240Б. – М: Транспорт, 1978. – 310с.
2. Батищев А.Н., Голубев И.Г., Лялякин В.П. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники. – М: Информагротех, 1995. – 294 с.
3. Глазунов С.Н. Курс лекций: Технологические процессы реновации. – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
4. Шиповалов А.Н. Технология восстановления кулачков распределительных валов плазменной наплавкой // Автореферат. –М: ФГОУ ВПО ГРАЗУ, 2010. – 17с.
5. Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей. – М: Колос, 1981. – 351 с.
6. Воцанов К.П. Ремонт оборудования сваркой. – М: Машиностроение, 1967. – 192 с.
7. Молодык Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин. Справочник. – М: Машиностроение, 1989. – 480с.

Интернет-ресурсы:

8. http://ru.wikipedia.org/wiki/Двигатель_внутреннего_сгорания.
9. <http://www.avcd.ru/elektrokontaktnaya-privarka-lentyi-provoloki-2.html> - Авто-Вох.
10. <http://www.sandvik.coromant.com/> - Компания «Sandvik. Coromant».
11. <http://www.plasmacentre.ru/technology/8.php> - Научно – производственная фирма «Плазмацентр».
12. <http://www.harverst.com> - Харьковский станкостроительный завод.
13. <http://splav.kharkov.com> - "Марочник стали и сплавов".
14. <http://dlja-mashinostroitelja.info/2011/03/vosstanovlenie-detalej-gazoraspredelitel'nogo/> - Машиностроение.
15. <http://websvarka.ru/weld-91.html> - форум сварщиков.
16. <http://www.dissercat.com/content/vosstanovlenie-detalei-mashin-elektrokontaktnoi-privarkoi-metallicheskoi-lenty-cherez-promez> – Бурак П.И. Интенсификация электроконтактной приварки лент при восстановлении деталей // Диссертация. – М: ФГОУ ВПО МГАУ, 2004.

УДК 621.791.927.5

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МАХОВИКА АВТОБУСА «ИКАРУС» ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ШИХТЫ

Матвей Андреевич Гусаров

Студент 5 курса

кафедра «Технологии обработки материалов»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: С.Н. Глазунков

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов»

При длительной эксплуатации машины достигают такого состояния, что восстановить их работоспособность можно только проведением капитального ремонта. Необходимость такого ремонта машин предопределяется изменением во времени их технического состояния. А экономическая целесообразность данного вида ремонта обуславливается возможностью использования 20-30% бездефектных деталей. Так, годные без ремонта детали, требуемые затрат составляют 7-10% от стоимости аналогичной детали.

Затраты на восстановление детали, как правило, не превышают 60-70% стоимости новых запасных частей. Повторное использование исправленных деталей позволяет экономить Ме, электроэнергию и другие ресурсы. Важнейшим резервом увеличения использования является восстановление изношенных деталей, позволяющее повторно, а иногда и многократно использовать.

Ежегодно миллионы деталей выбраковываются и поступают на переплавку из-за износа рабочих поверхностей в доли мм или других дефектов, возникших в процессе эксплуатации, которые могут быть устранены тем или иным способом обработки. Восстановление – это комплекс операций по устранению основных дефектов деталей, обеспечивающий возобновление работоспособности и параметры нормативно-технической документации.

Настоящая работа посвящена исследованию процесса электродуговой наплавки маховика из серого чугуна с применением ферромагнитной шихты [1]. Деталь типа маховик (рис. 1) есть в каждом кривошипно-шатунном механизме двигателя. Маховик уменьшает неравномерность работы двигателя, выводит поршни из мертвых точек, облегчает пуск двигателя и способствует плавному старту автомобиля с места.

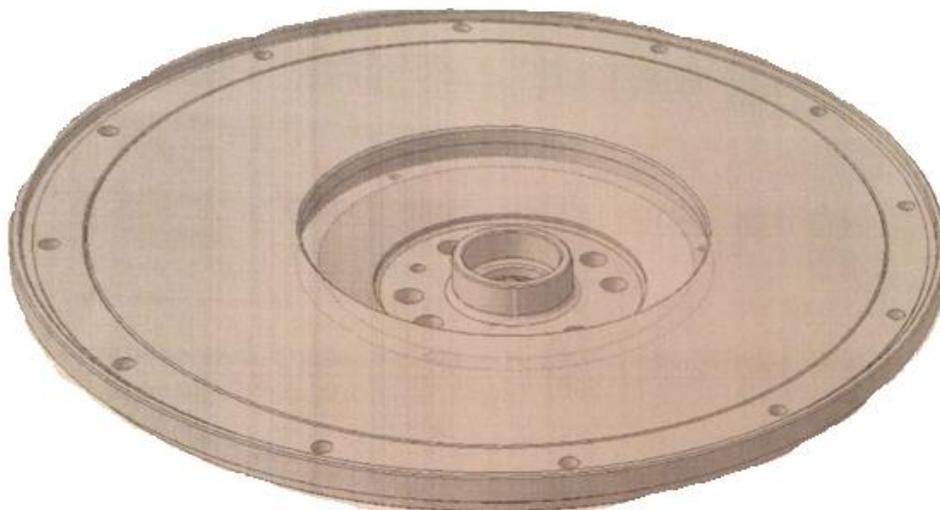


Рис. 1. Маховик

Маховик изготовлен в виде массивного чугунного диска и прикреплен к фланцу коленчатого вала болтами и гайками. При изготовлении маховик балансируется вместе с коленчатым валом. Для предотвращения нарушения балансировки при разборке двигателя маховик установлен на несимметрично расположенные штифты или болты. Зубчатый венец, напрессованный на маховик, служит для запуска двигателя стартером.

Деталь изготовлена из серого чугуна марки СЧ30 и имеет диаметр 485 мм. Характерные дефекты: износ и трещины на торцевой поверхности маховика.

Восстановление деталей машин из чугуна способами электродуговой наплавки связано со следующими трудностями: возникновение горячих и холодных трещин, обусловленное повышенным содержанием углерода, серы и фосфора; высокая жидкотекучесть чугуна; повышенная склонность к порообразованию; отбеливание чугуна, что делает невозможным последующую механическую обработку; возникновение значительных сварочных напряжений, связанных с нагревом металла.

Ферромагнитная шихта для дуговой наплавки деталей машин, изготовленных из чугуна, может быть использована при автоматической сварке и наплавке [2]. Наплавку ведут непрерывной электродной проволокой, на которую подается магнитная шихта, и под действием собственного магнитного поля сварочной цепи притягивается к ней, образуя покрытие, аналогичное электродному. Для обеспечения притягивания шихты к электродной проволоке в состав шихты вводятся ферромагнитные компоненты (Fe, FeCr).

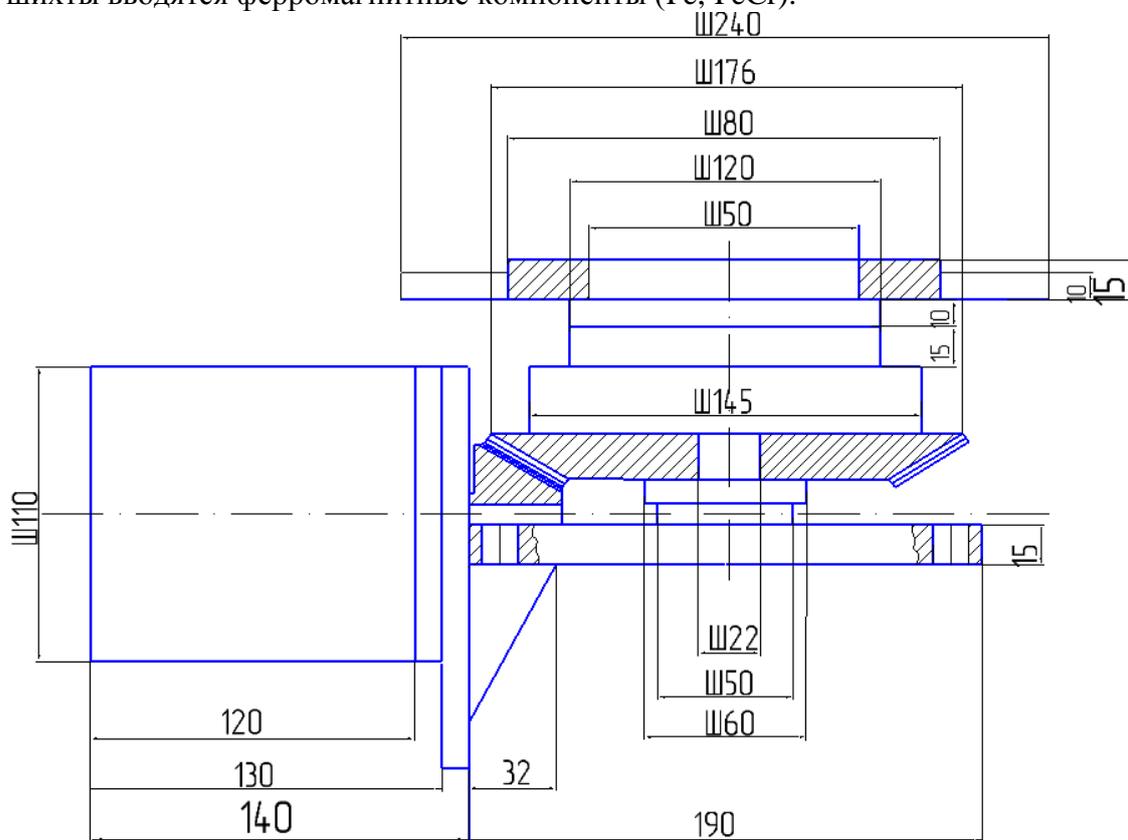


Рис. 2. Конический дифференциал для крепления маховика.

Восстановление деталей методом электродуговой наплавки с применением ферромагнитной шихты – сложный организационно-технологический процесс, при котором в отличие от производства новых деталей в качестве заготовки используют изношенную, но уже сформированную деталь. В этом случае затраты на выполнение таких операций, как литье, ковка, штамповка и т.п. отсутствуют.

Процессы сварки или наплавки всегда связаны с возникновением сварочных деформаций и напряжений в деталях (конструкциях), подвергающихся термическому воздействию [3].

Величина зоны высоких сварочных напряжений и уровень деформации определяется количеством локальной энергии, вводимой в единицу времени или объемом наплавленного металла и шириной зоны разогрева до температур, где металл претерпевает структурные превращения, вследствие чего металлы, имеющие высокую прочность, при сварке или наплавке склонны к образованию горячих и холодных трещин.

Наплавка ферромагнитной шихтой.

Рассматриваемый способ позволяет подобрать такой состав шихты и режимы наплавки, которые обеспечивают стабильное горение дуги при относительно небольших значениях тока (минимальная погонная энергия) и получение бездефектного слоя с небольшими напряжениями и деформациями, отвечающего необходимым эксплуатационным требованиям без дополнительной термообработки.

Данная работа содержит результаты экспериментов, проведение которых позволило максимально приблизиться к реальным условиям процесса восстановления. Основной задачей экспериментов было, во-первых, ознакомление с технологией восстановления, во-вторых, выявление влияния различных параметров процесса на процесс восстановления, на характеристики наплавленного слоя и основного металла. Важной задачей экспериментов было получение необходимой твердости и структуры в наплавленном слое.

В качестве оборудования для наплавки направляющих использовалась имеющаяся на кафедре МТ13 МГТУ им. Баумана установка УД 209 УХЛ4, позволяющая производить наплавку под слоем флюса, в среде защитных газов или с использованием ферромагнитной шихты деталей вращения диаметром от 40 до 400 мм. Установка дает возможность наплавлять цилиндрические поверхности, заваривать шлицы, шпоночные канавки, резьбу. При наплавке применяется наплавочная проволока диаметром 1,6 мм. Скоростью подачи проволоки 2-3 м/мин.

Так как данная установка позволяет наплавлять только детали с горизонтальной осью вращения, то станок требовалось модернизировать. Для таких целей был применён конический дифференциал (рис. 2), позволяющий наплавлять детали с вертикальной осью вращения.

Таким образом, модернизированный станок УД209 УХЛ4 (рис. 3) позволяет наплавлять детали с вертикальной осью вращения.

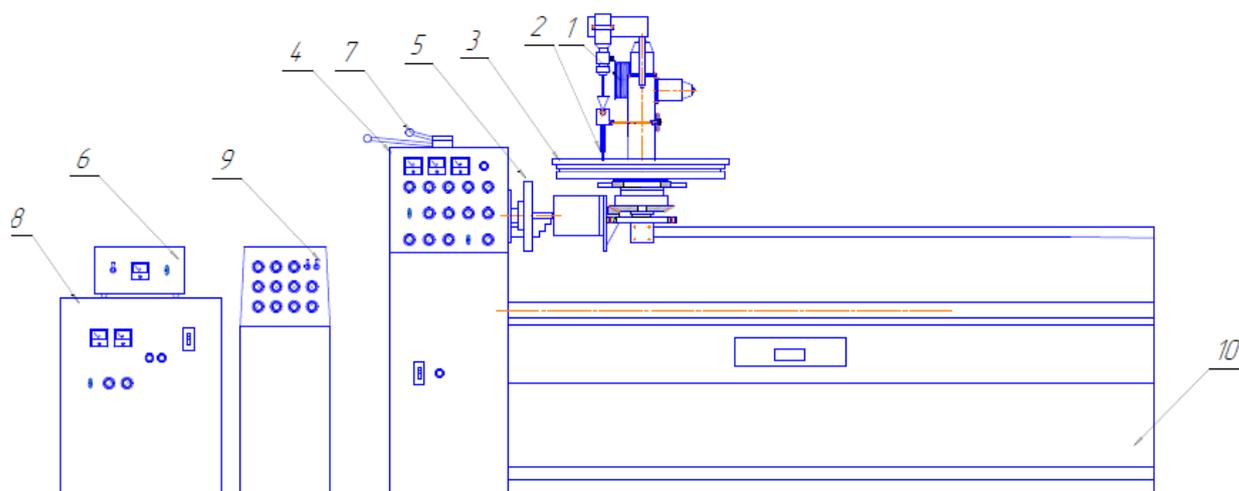


Рис. 3. Модернизированный станок УД209 УХЛ4.

В состав наплавочного станка входят: бухта с проволокой (1), наплавочная головка (2), пульт управления (4), трёхкулачковый патрон (5), пульт управления подачи проволоки (6), рычаги переключения (7), сварочный выпрямитель (8), пульт управления механизмом колебаний (9), станина (10). Наплавляемая деталь обозначена (3).

Существуют различные схемы наплавки деталей типа «диск».

Наплавочный станок УД209 может работать в двух режимах:

- наплавка по кольцу (рис. 4, 5);
- наплавка по винту (рис. 6, 7);

Наплавка может происходить с колебаниями и без колебаний. Так как для наплавки по винту необходима автоматизация станка, то наплавлять будем по кольцу. Чтобы избежать сильных перегревов выбираем наплавку без колебаний.

Для деталей типа «диск» наплавка осуществляется обратноступенчатым способом сварки. До наплавки маховик подогревают до температуры 200° . После наплавки деталь накрывается асбестом для медленного остывания. Данная процедура позволяет избежать появления трещин, раковин и отбела чугуна.

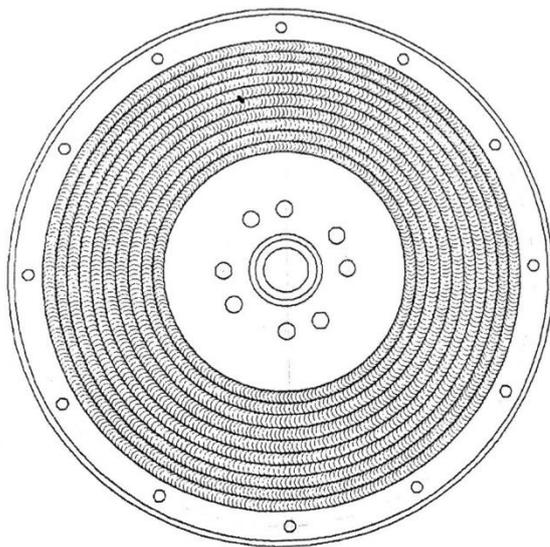


Рис. 4. Наплавка по кольцу без колебаний

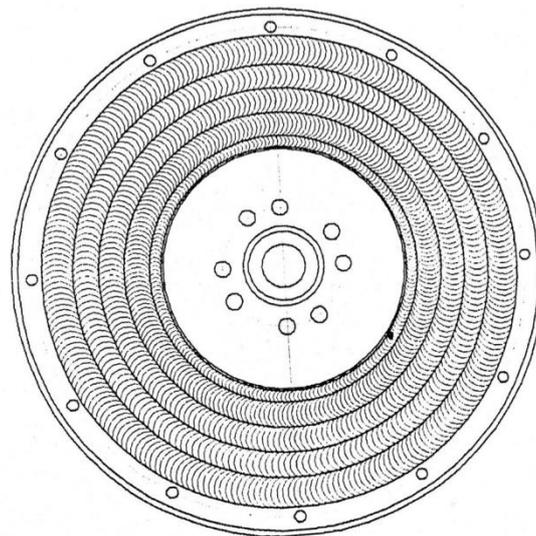


Рис. 5. Наплавка по кольцу с колебаниями

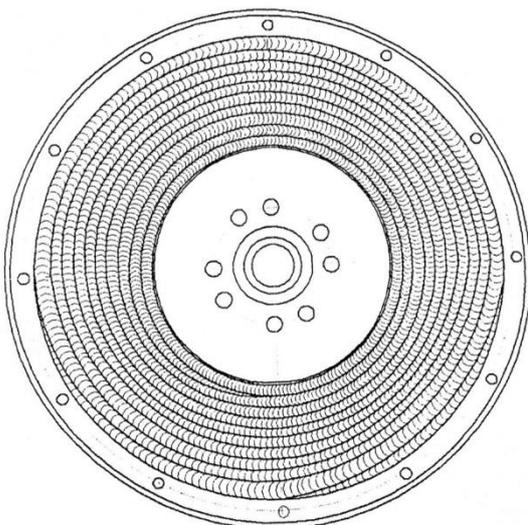


Рис. 6. Наплавка по винту без колебаний

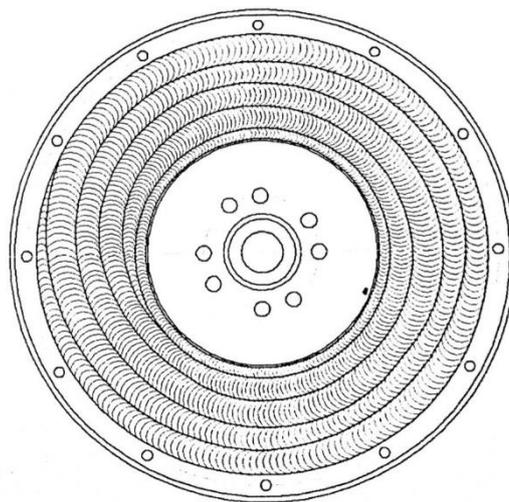


Рис. 7. Наплавка по винту с колебаниями

Ферромагнитная шихта.

Состав ферромагнитной шихты подбирается исходя из следующих условий [4]:

1. шихта должна быть магнитной, чтобы обеспечивать притягивание шихты электродом под действием электромагнитных сил.

2. стабильное горение дуги при малых токах наплавки ($I = 140 - 170 \text{ A}$), что обеспечивает незначительные сварочные деформации и напряжения.

3. получение бездефектного наплавленного слоя (без пор, трещин, шлаковых включений).

4. обеспечение необходимой износостойкости наплавленного слоя без дополнительных посленаплавочных технологических мероприятий (термообработка, упрочнение поверхностного слоя).

5. дешевизна и доступность материалов, входящих в состав шихты.

Для более полного протекания металлургических процессов в ванне расплавленного металла при наплавке необходимо обеспечить:

- определенную грануляцию шихты и ее компонентов,
- определенное процентное соотношение элементов, входящих в состав шихты,
- спекание магнитных и немагнитных материалов.

Материалы шихты в зависимости от их магнитных свойств просеиваются:

- магнитные – через сито №04 (размер ячейки 0.4 мм.),
- немагнитные – через сито №018 (размер ячейки 0.180 мм).

После просеивания компоненты взвешиваются в определенной пропорции и замешиваются на жидком натриевом стекле до получения влажной однородной массы. С целью спекания магнитных и немагнитных материалов полученную влажную массу прокаливают в печи при температуре 400°C до полного ее просыхания. Полученную спеченную смесь подвергают дроблению и просеивают через сито №04 (размер ячейки 0.4 мм.).

В состав шихты входят рудоминеральные материалы, ферросплавы, чистые металлы, химические продукты, силикаты, графит.

Рудоминеральные материалы:

Мрамор CaCO_3 – (CaCO_3 92%; остальное MgO ; SiO_2 ; P; S);

Плавленый шпат CaF_2 – (CaF_2 95%; остальное SiO_2 ; CaCO_3 ; P; S);

Ферросплавы:

Феррохром FeCr (Cr 65%; остальное Fe; C; Si; P; S);

Феррованадий FeV (V 35%; остальное Fe; Mn; Si; C; Cu; Al; P; S);

Ферротитан FeTi (Ti 28%; остальное Fe; Al; Si; C; P; S);

Чистые металлы:

Порошок железный Fe (Fe 98.5%; остальное C; P; S);

Химические продукты:

Силикокальций SiCa (Ca 20%; Fe 10%; остальное Si; Al; C);

Силикаты:

Стекло натриевое жидкое (SiO 32%; NaO 11%; остальное FeO ; Al_2O_3 ; Ca_2O ; SO_2);

Примечание: элементы, указанные как «остальное», расположены в порядке убывания их содержания.

Магнитные свойства шихты обеспечиваются наличием в ее составе ферромагнитных материалов (Fe; FeCr).

Получение бездефектного наплавленного слоя обеспечивается наличием в шихте шлакообразующих (SiCa , CaCO_3 ; CaF_2) и раскисляющих (FeTi , FeMn , FeSi , SiCa) компонентов. SiCa , CaCO_3 , CaF_2 в совокупности обеспечивают защиту расплавленного металла от вредного влияния атмосферы (снижение вероятности порообразования и окисления) и способствуют связыванию и удалению в шлак ответственных за образование трещин S, P, H. SiCa кроме того является раскислителем, а так же способствует легкому удалению шлаковой корки с поверхности наплавленного слоя. FeTi , SiCa являются раскислителями, а так же способствуют измельчению структурных составляющих наплавленного слоя, что снижает вероятность трещинообразования.

Компоненты FeCr , FeTi , FeV и углерод (C) в совокупности позволяют получить наплавленный металл повышенной прочности и износостойкости без последующей

термообработки в результате образования структуры мартенсита с карбидом хрома (Cr), ванадия (V), титана (Ti), обладающими более высокой, по сравнению с карбидами железа (Fe), твердостью.

Жидкое натриевое стекло выполняет функцию связующего компонента при изготовлении шихты и обеспечивает стабильное горение дуги на малых токах.

Исследовательская часть.

Физико-механические свойства наплавленного слоя зависят от состава ферромагнитной шихты. В результате экспериментов были получены данные, позволившие составить сравнительную характеристику наплавочных материалов и наплавленных слоев. Для эксперимента была осуществлена наплавка на плоские образцы (рис. 8, 9) из серого чугуна марки СЧ-30. Была получена наплавка шириной 12 мм длиной 120 мм.



Рис. 8. Наплавленный образец.

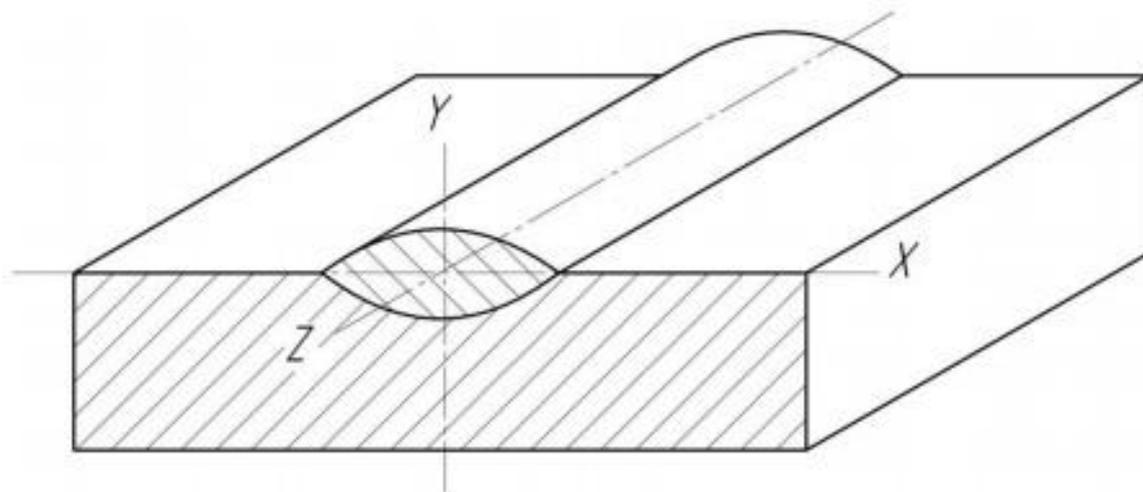


Рис. 9. Схематическое изображение наплавленного образца.

Для наплавки использовалась шихта, состав которой приведён в таблице 1.

Таблица 1. Состав шихты

	Fe, %	C, %	SiCa, %	FeTi, %	CaF ₂ , %	CaCO ₃ , %
	50	15	15	4	8	8
	55	10	10	5	10	10
	31	30	15	0	12	12

Далее определялась твердость поверхности наплавленного слоя с шагом 10 мм на твердомере ТКС-1М со шкалой HRC. Полученные данные по твердости приведены в таблице 2.

Таблица 2. Твердость наплавленного слоя

№ образца	Твердость, HRC									
	8	3	2	6	1	2	9	4	7	0
1	8	3	2	6	1	2	9	4	7	0
2	7	1	2	5	0	1	6	3	0	2
3	1	9	4	3	0	5	9	7	2	5

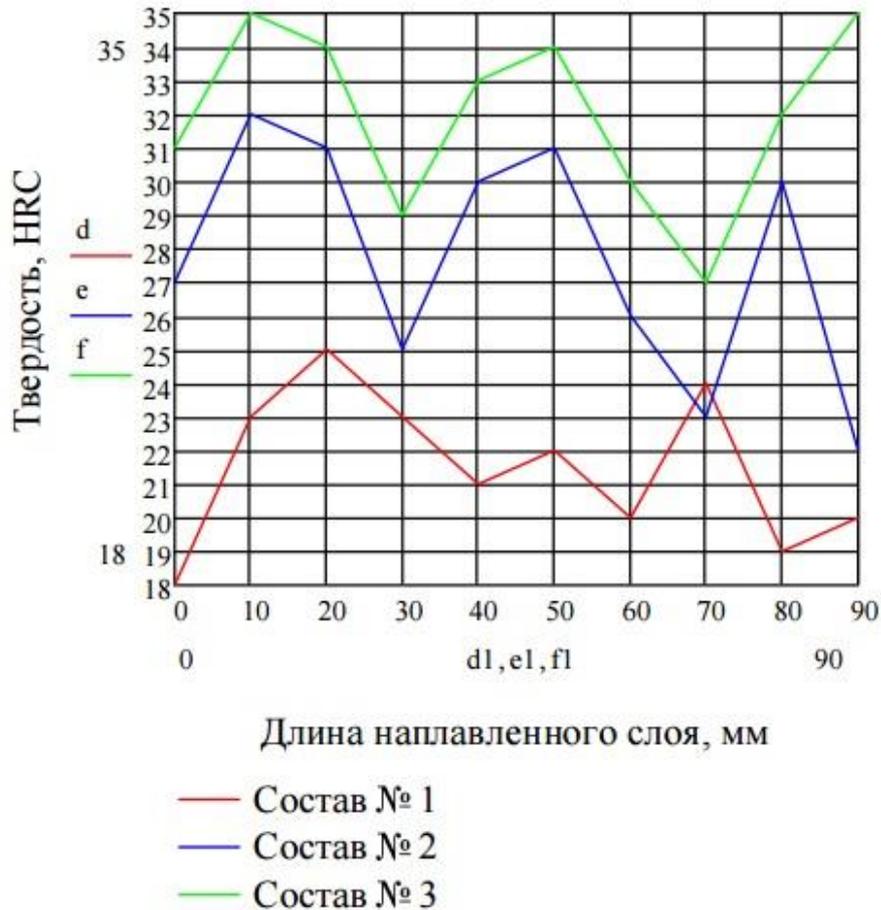


Рис. 10. Изменение твердости на поверхности наплавленного слоя.

На следующем этапе произведено 10 измерений твердости с шагом 2 мм, как показано на рисунке 11.

Полученные значения твердости приведены в таблице 3:

Таблица 3. Твердость образца и наплавленного слоя

№ образца	Твердость, HRC									
	9	0	1	0	1	1	3	5	2	4
1	9	0	1	0	1	1	3	5	2	4
2	9	9	1	0	9	2	5	0	8	1
3	0	1	9	9	0	4	7	2	4	5

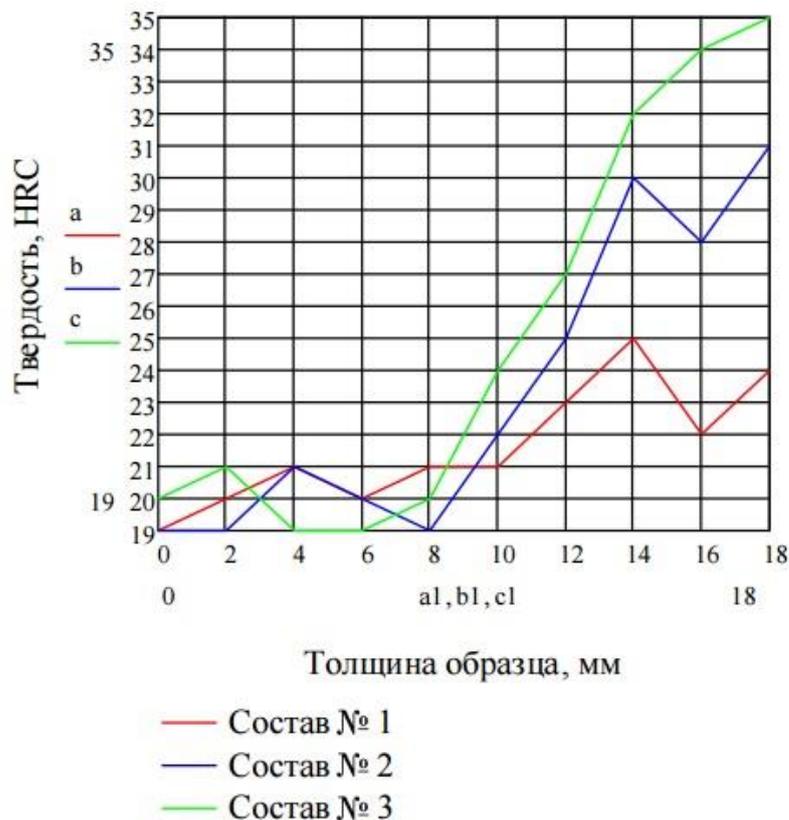


Рис. 11. Изменение твердости образца и наплавленного слоя

По результатам видно, что твердость существенно изменяется от состава шихты. Более низкая твердость имеет образец №3, что можно объяснить отсутствием в составе ферротитана. А высокая твердость образца №2 по сравнению с образцом №1 обусловлена повышенным содержанием кремния, так как этот элемент повышает углеродный эквивалент. Состав №1 обеспечил твердость, которую должен иметь маховик.

Литература

1. Глазунов С.Н., Гаврилюк В.С., Вялков В.Г., Овешников А.В. Технология восстановления стальных и чугунных деталей транспортных машин методом электродуговой наплавки с применением ферромагнитной шихты // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 6. С. 3–5.
2. Ферромагнитная шихта для дуговой наплавки деталей машин, изготовленных из железоуглеродистых сплавов: пат. 2448823 Российская Федерация: МПК В23К 35/36 / Глазунов С.Н. и др.; заявитель и патентообладатель Апраксин Д.В. – № 2010104100/02; заявл. 09.02.2010; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12. – 7 с.
3. Глазунов С.Н. Курс лекций: Технологические процессы реновации. – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009 г., 99с.
4. Апраксин Д.В., Варламова Л.Д., Вялков В.Г., Глазунов С.Н., Слинко Д.Б. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине технологические процессы

УДК 621.793.72

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛУОСЕЙ СТУПЕНЕЙ ЭСКАЛАТОРА

Андрей Викторович Кавешник

*Студент 4 курса**кафедра «Технологии обработки материалов»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: Д.Б. Слинко**кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов»***Аннотация**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по отработке технологии восстановления полуоси ступени эскалатора. На основе анализа условий работы детали, величины износа и требований к наплавленному слою в качестве метода наплавки была выбрана скоростная плазменно-порошковая наплавка, обеспечивающая минимальное проплавление основного металла, высокую производительность и минимальный расход присадочных материалов. Экспериментально установлены марки присадочных порошков, их соотношение и размер частиц порошков, обеспечивающих высокое качество наплавленного слоя. Анализ микроструктуры позволил установить отсутствие пор и трещин в наплавленном слое и переходной зоне. Твердость наплавленного слоя в среднем превышает в 1.6 раза твердость основного металла, что позволит увеличить износостойкость и, соответственно, продлить рабочий ресурс восстановленной полуоси ступени эскалатора.

Метрополитен - один из основных видов городского пассажирского транспорта. Эксплуатация эскалатора метрополитена связана с повышенной опасностью для пассажиров и требует особого внимания и осторожности, в связи с чем, очень важно проводить своевременно ремонт деталей механизма эскалатора. В данной работе рассмотрен процесс восстановления полуоси ступени эскалатора. К данной детали предъявляются очень высокие требования к качеству поверхности и механическим свойствам, т.к. поломка детали может привести к несчастным случаям. Поэтому к ремонту полуоси нужно подходить с особой ответственностью.

Для выбора оптимального способа восстановления изношенной полуоси был проведен анализ условий её работы. В процессе эксплуатации полуось испытывает большие нагрузки и подвергается скручиванию, изгибу и механическому изнашиванию [1]. Крутящий момент, развиваемый на звездочке 6, передает его на полуось 4, а полуось через ступицу передает крутящий момент на платформу 7 и та приходит в движение ступень эскалатора (рис.1).

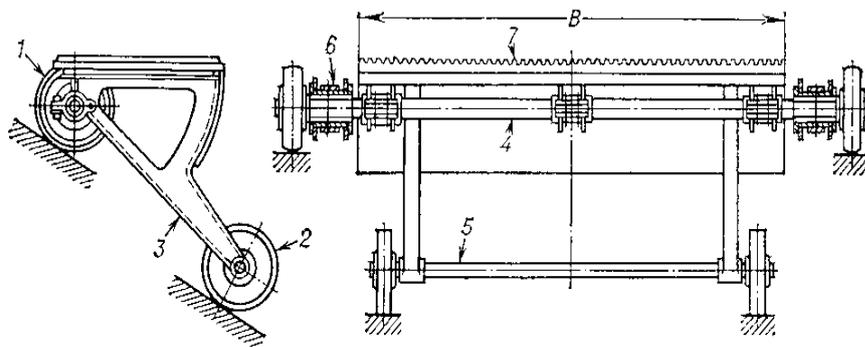


Рис.1. Схема ступени эскалатора: 1,2- ролики ,3-рама 4- полуось , 5-ось , 6-звездочки , 7- платформа

Силы, действующие на полуось, складываются из крутящего момента на звездочке и инерционных сил движущихся масс. Особенно большие силы возникают в момент выключения всего механизма. В процессе эксплуатации из-за изнашивания рабочей поверхности полуоси или неточности монтажа возникает изгибающий момент. Все эти нагрузки и силы действующие на полуось приводят к появлению дефектов и интенсивному изнашиванию.

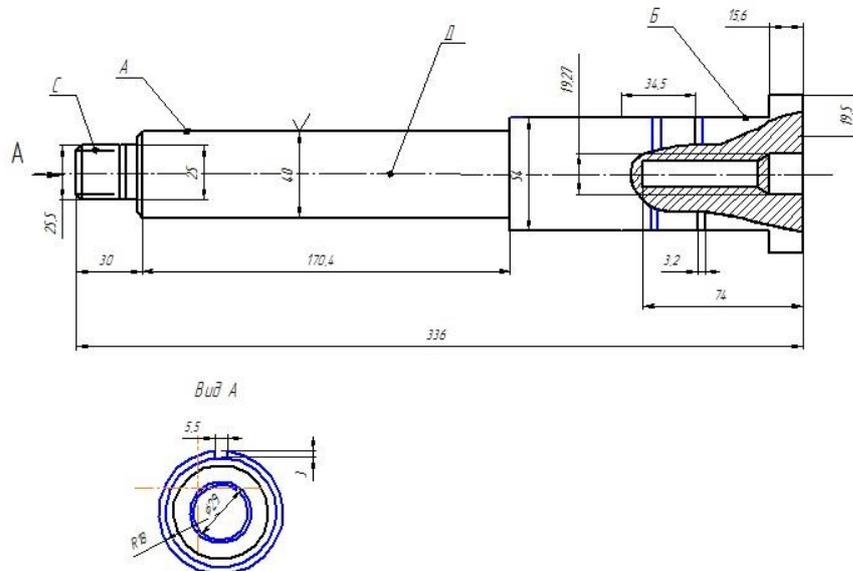


Рис.2. Полуось ступени эскалатора метрополитена

В процессе эксплуатации основным дефектом, который снижает эксплуатационные свойства полуоси является износ её поверхности А (рис.2). Данная поверхность сопряжена с втулками и через них передает крутящий момент. Материал полуоси – сталь 40ХН. Твердость - 219-277НВ. Износ поверхности А составляет порядка 0.2-0.4 мм на сторону.

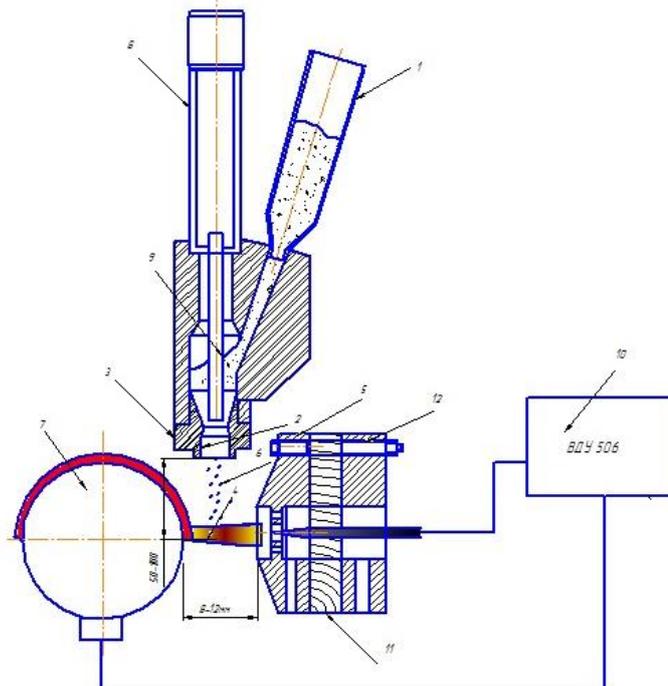


Рис.3. Схема наплавки с гравитационной подачей порошка в столб дуги.

1-бункер для порошка; 2-отверстие для дозирования порошка; 3-вставка с дозирующим отверстием; 4-столб плазменной дуги; 5-плазматрон; 6-струя порошка; 7-наплавляемая деталь; 8-клапан электрический; 9-игла запорная; 10-источник питания;

В результате проведенного анализа в качестве метода восстановления полуоси был выбран метод скоростной плазменно-порошковой наплавки [2], т.к. данный метод обеспечивает минимальное проплавление основного металла, высокую производительность и минимальный расход присадочных материалов.

Основной особенностью скоростной плазменно-порошковой наплавки является схема подачи порошка (рис.3). В отличие от традиционных способов, где порошок подается через плазматрон, в данном методе наплавки используется гравитационная схема подачи порошка в дугу. Такой способ подачи порошка позволяет экономить газ, т.к. его не нужно расходовать на его транспортировку в дугу. Кроме того, в этом случае не происходит налипания расплавленных частиц порошка на плазматрон, что увеличивает срок его службы.

Скоростной метод плазменно-порошковой наплавки позволяет гарантированно наносить наплавляемый слой толщиной от 0.1 мм, что выгодно отличает его от других методов наплавки.

Высокая производительность тонкослойной плазменно-порошковой наплавки снижает удельный расход порошковых материалов, электрической энергии и защитных газов (аргона). Поверхностный слой наплавленного металла формируется ровным, без наплывов, что снижает объем механической обработки восстановленных деталей.

В процессе восстановления полуоси после моечной и дефектовочной операции производится подготовка изношенной поверхности детали к наплавке на токарном станке с целью снятия припуска под наплавку и удаления дефектного слоя.

Режимы токарной обработки : подача - 0,5 мм/об, глубина резания -0.3мм, скорость вращения -80 об/мин. Диаметр полуоси после предварительной механической обработки -39,0 мм.

Основной операцией при восстановлении полуоси является наплавочная операция. Все экспериментальные работы по плазменно-порошковой наплавке проводились с использованием токарного станка 16К20, на суппорте которого был установлен наплавочный узел, состоящий из порошкового питателя, бункера с порошком, плазмотрона оригинальной конструкции и панели управления (рис.4). Для предохранения от выхода из строя плазмотрона, в результате его перегрева была предусмотрена система его охлаждения. В качестве источника тока использовался сварочный выпрямитель марки ВДУ-506. В качестве защитного и плазмообразующего газа использовался газ аргон.



Рис. 4. Узел плазменно-порошковой наплавки.

При отработке технологии наплавки в качестве присадочных материалов применялись различные марки порошков: ПР—Н68Х21С5Р, ПР—К60Х30ВС, ПР — 10Р6М5, ПР-Н4Д2М, ПР-Н9Г4СР; ПР — 10Р6М5 в различных комбинациях и соотношениях. По результатам проведенных экспериментов в качестве присадочного материала была подобрана смесь порошков ПР-Н4Д2М и ПР-Н9Г4СР в соотношении 1:1. Величина фракции порошков составляла 50-150 мкм. Химический состав используемых порошков: ПР-Н9Г4СР: Ni-основа, Cu- 42,5, С- 0,2, Si- 0,9, В- 1,0, Fe< 3,0; температура плавления - $T = 1130 - 1150$ °С; твердость покрытия - 42-48 НРС; ПР-Н4Д2М : Fe-основа; $C \leq 0,12$; Ni-4; Cu-1,5; Мо-0,5; температура плавления - $T = 1070$ °С; твердость покрытия. - 38-45НРС.

В процессе отработки технологии были экспериментально выбраны следующие режимы наплавки: подача - 0,5 мм/об; скорость вращения детали -12,5об /мин; сварочный ток -240 А; общий расход смеси порошков-100г/мин; расход защитного газа -12.5 л./мин.; расход плазмообразующего - 1.5 л. / мин. Наплавка на данных режимах обеспечивает толщину наплавленного слоя 0.8мм.

После наплавки производился визуальный контроль качества наплавленного слоя и финишная обработка полуоси на круглошлифовальном станке марки ЗД-4230 на следующих режимах: подача - 0,5 мм/об, скорость вращения -120 об /мин, глубина шлифовки -0.2 мм (рис.5).



Рис.5. Восстановленная полуось.

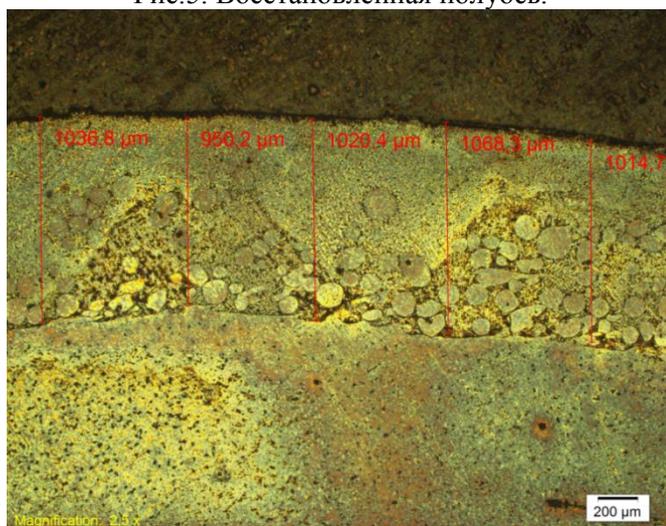


Рис.6. Микрофотография образца, увеличение в 50 раз.

Для анализа качества и свойств наплавленного слоя полуоси был изготавливался шлиф для проведения исследований и замера микротвердости.

Анализ микроструктуры (рис.6) позволил установить отсутствие пор, трещин в наплавленном слое и зоне термического воздействия. Микротвердость измерялась с помощью микрометра КМГ-1.

Результаты исследований микротвердости представлены на рисунке 7.

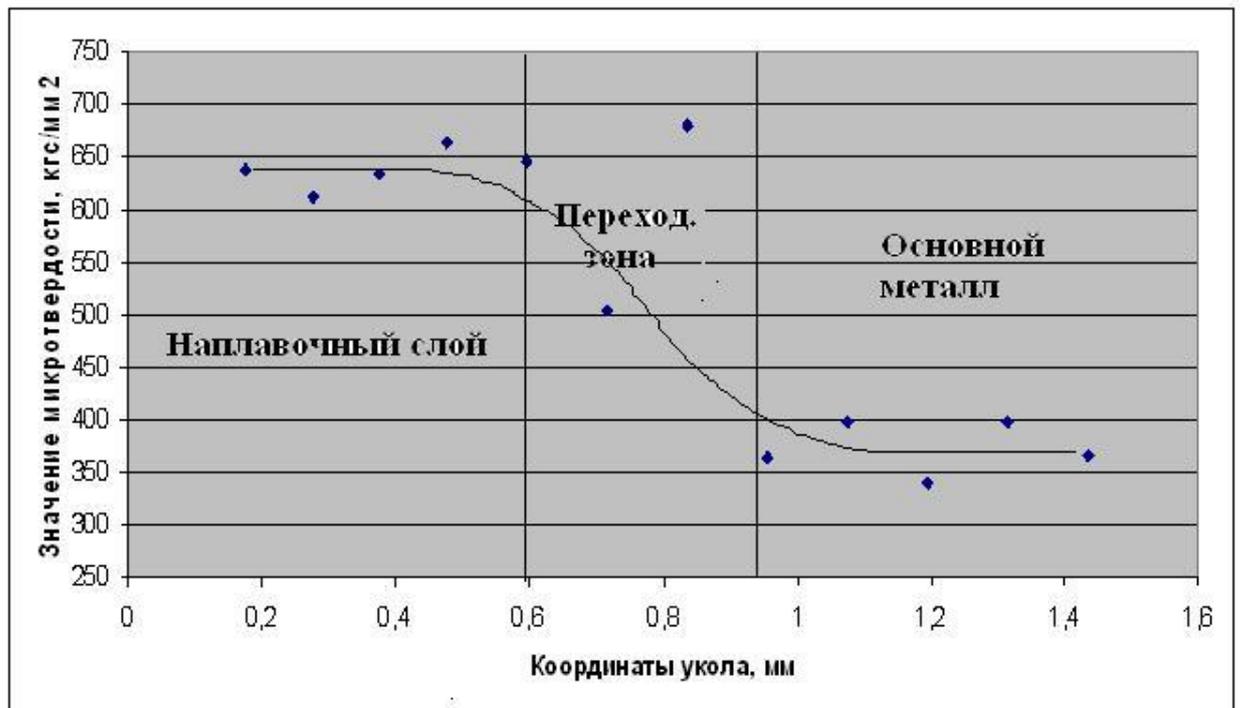


Рис.7. Изменение микротвердости по глубине шлифа

По результатам исследования можно сделать вывод, что твердость наплавленного слоя -614 кгс/мм^2 значительно выше, чем твердость основного металла 365 кгс/мм^2 .

Выводы:

1) Для наплавки полуоси метрополитена выбран метод скоростной плазменно-порошковой наплавки, обеспечивающий минимальное проплавление основного металла, экономию электроэнергии и присадочных материалов.

2) В качестве присадочных материалов использовались порошки марки ПР-Н4Д2М и ПР-Н9Г4СР в соотношении 1:1, фракции 50-150 мкм. которые обеспечивают высокое качество наплавленного слоя без пор и трещин.

3) Измерения микротвердости позволяют установить, что средняя твердость наплавленного слоя составляет -614 кгс/мм^2 , средняя твердость основного металла -365 кгс/мм^2 .

Литература

1. Олейник А.М., Поминов И.Н. Эскалаторы. М., 1985 Технические характеристики и устройство эскалаторов метрополитенов. 89-91с
2. Ожигов Н.М. Устройство для плазменной наплавки (Патент SU 1720827):
3. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П. Константинов В.М. Восстановление деталей машин. - М.: Машиностроение, 2003. - 672 с.
4. Гладкий П.В. и др. Плазменная наплавка. - Киев: Екотехнология, 2007. -292с.

УДК 007.5

ВНЕДРЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ И ИНФОРМАЦИОННЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федор Константинович Колинко

Бакалавр 4 курса

кафедра «Реновационные технологии»

Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель: Э.Л. Мельников

доктор технических наук, профессор кафедры «Реновационные технологии»

Информационные технологии в постоянно развивающемся мире не стоят на месте и одна из задач каждой отдельно взятой страны – не отставать от этих темпов. Особенную актуальность этот момент приобретает в сфере машиностроения.

Одной из наиболее современных перспективных сфер в информационном мире в целом является робототехника, а в частности – робототехника машиностроительная. Она подразумевает под собой использование так называемых «промышленных роботов» на предприятиях для облегчения и повышения эффективности труда, а также улучшения качества изготавливаемой продукции либо выполняемой операции.



Рис.1. Модельный ряд промышленных роботов компании Fanuc Robotics.

Необходимо понимать, что значительную часть задействованных на предприятиях нашей страны роботов составляют примитивные двухкоординатные манипуляторы или промышленные роботы, поставленные во времена СССР.

Современные промышленные роботы имеют, как правило, шесть осей подвижности и напоминают человеческую руку, способную с невероятной точностью и силой выполнять сложнейшие манипуляции. Их стоимость, даже с учетом общей ежегодной динамики снижения по прежнему составляет десятки тысяч евро, а комплексные решения – сотни тысяч. Далеко не всем под силу, без привлечения альтернативных источников финансирования, зачастую

зарубежных, произвести модернизацию производства или осуществить замену старого оборудования.

Внедрение робототехники идет невысокими темпами. Резкого повышения спроса, который прогнозировали иные специалисты в промежуток с 2008 по 2014 годы не произошло, хотя в целом, интерес к технологиям такого рода растет с каждым годом.

Основа имеющегося на данный момент роста спроса – это большая потребность предприятий роботизировать сварочные процессы. В этом направлении Российские разработчики электротехники и систем управления уверенно догоняют своих западных коллег и перестают быть незначительными по сравнению с мировыми тенденциями.

Также, как и в Европе промышленные роботы в России начали внедрять и для процессов паллетирования, автоматизации процессов резки, упаковки и маркировки, обслуживания станков, покраски, механообработки, манипулирования. Все эти направления – это огромный потенциал для роста российского и мирового спроса на внедрение роботов.

Говоря о промышленных роботах российского производства, необходимо сразу разделить понятия. Производители роботов не занимаются созданием технологий для конечного заказчика, данные задачи выполняют квалифицированные системные интеграторы, имеющие партнерские или дистрибьюторские отношения с самими производителями.

Промышленные роботы Российского производства, а не только их прототипы, появились достаточно недавно, но уже можно говорить об их серийном производстве. Российским производителям предстоит еще долгий и нелегкий путь самоутверждения в этом направлении.

В настоящий момент в соответствии с данными, полученными с сайта <http://elec.ru>, роботизация производится лишь на 15% предприятия на территории Российской Федерации. В большинстве случаев владельцы предприятий обходятся ручным трудом, исходя из финансовых и экономических соображений. 95% от уже внедренных промышленных роботов приходится на автоматизацию процессов сварки.

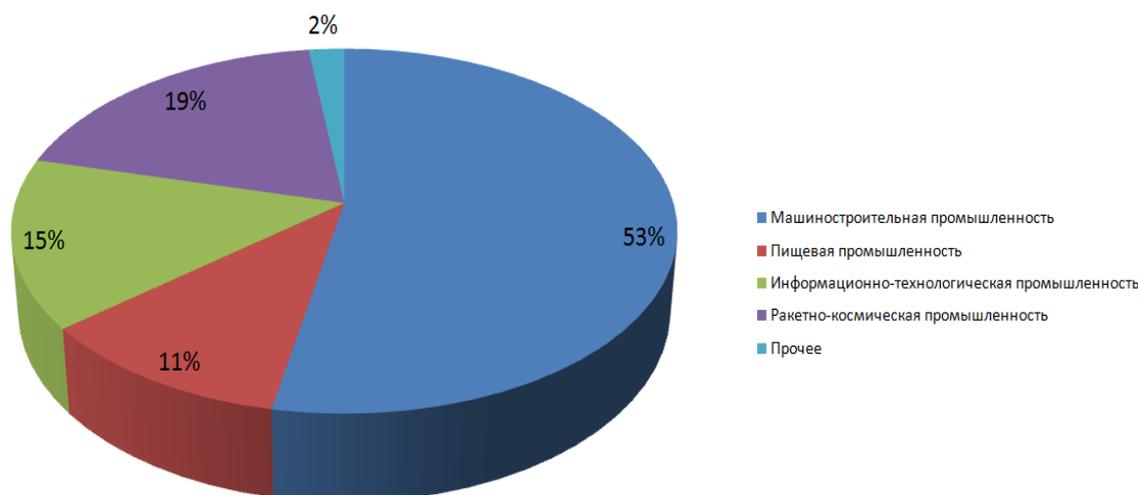


Рис. 2. Доля использования роботов в различных отраслях промышленности Российской Федерации.

Огромная задача по разработке и внедрению новых роботизированных комплексов возлагается на независимых отечественных конструкторов.

С увеличением количества в России множества вредных производств, на которых трудятся исключительно роботы, а также с повышением в Европе и США спроса на технологии роботизированной 3d-резки, покраски, механообработки, обслуживания листогибочных и прессовых машин, системы автоматического паллетирования началась зарождаться своя ниша для отечественных разработчиков.

Одной из главных проблем для местных разработок является экономическая составляющая нашей страны. Если в Европе и США можно взять кредит под <2% годовых, то в Российской Федерации эта цифра колеблется от 12 до 16%, что делает частное производство и внедрение роботизированных систем очень рискованным и сложным занятием.

В конце 2013 начал свою жизнь «стартап», основанный тремя единомышленниками, выходцами из Центрального Института Авиационного Моторостроения, который уже через полгода заинтересовал компанию Kawasaki Robotics и нашел свое воплощение в виде робота для точечной сварки VX200L, который отличает повышенная грузоподъемность, скорость и достаточно небольшой вес, по сравнению с аналогами.

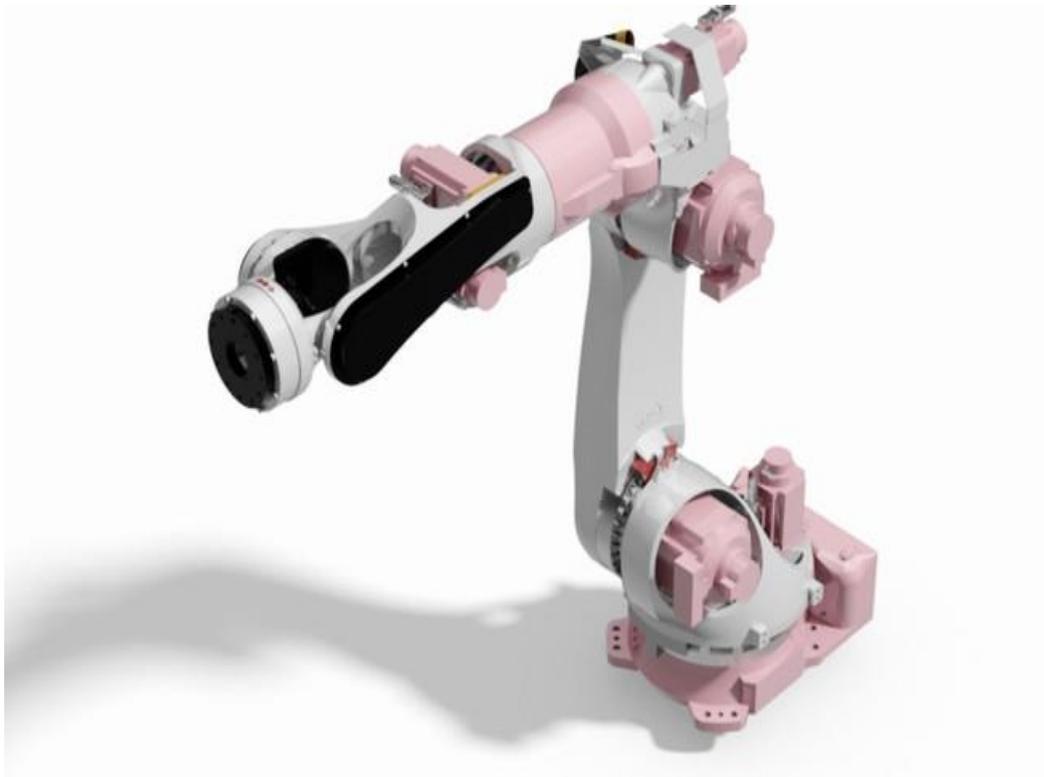


Рис. 3. Робот для точечной сварки VX200L.

Современные промышленные роботы, весьма надежны. Если не забывать про плановое, обслуживание, то срок службы может составить до 5 лет.

Сложно сравнивать уязвимость механики и программного обеспечения. Механическая часть робота может выйти из строя, но это происходит, как правило, по причинам его неправильной эксплуатации или физического воздействия. Совершенно неуместно говорить об уязвимости промышленных роботов. Если придерживаться элементарных эксплуатационных условий, то роботы проявят себя как сверхнадежные устройства. Например, на частном предприятии в г.Солигорск был установлен специальный защитный чехол для промышленного робота, так как среда его эксплуатации очень влажная и с большим содержанием кислоты в воздухе.

В настоящее время компания занимается не только проектированием новых моделей роботов для компаний Kawasaki Robotics и Fanuc, но и интегрированием уже имеющихся систем, а также разработкой абсолютно нового робота для точечной сварки, теперь - исключительно для использования на территории Российской Федерации. Полученный прототип уже позволил получить положительные оценки на международных презентациях и открывает дорогу нашей стране для выхода на огромный мировой рынок промышленной робототехники.

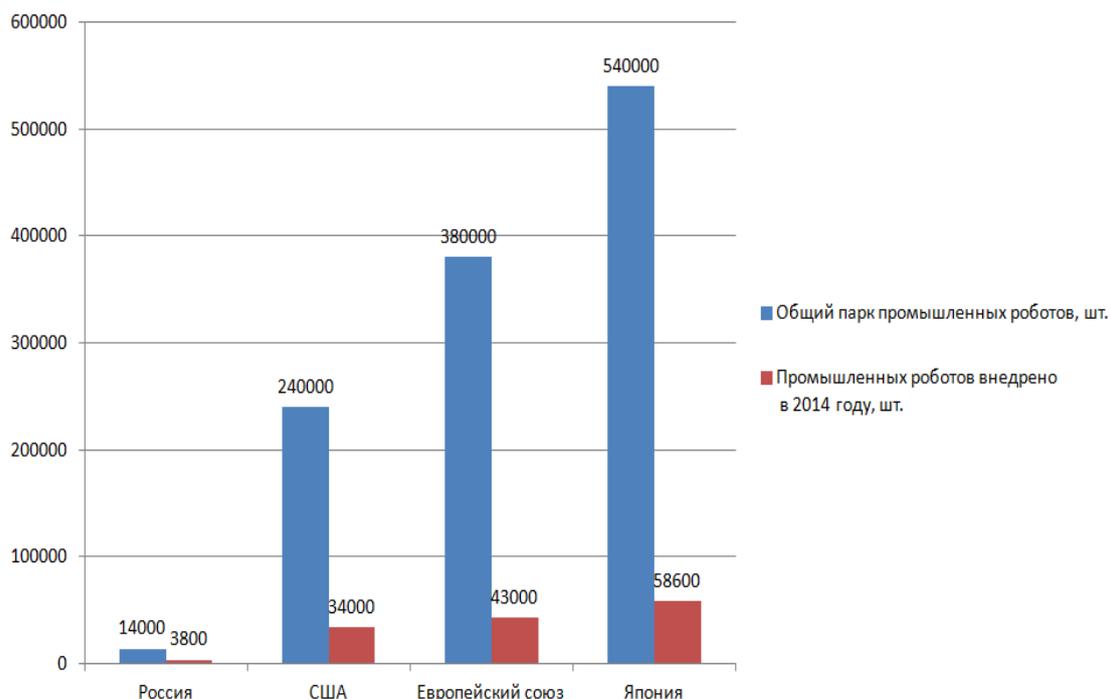


Рис.4. Степень роботизации основных стран рынка мировых технологических инноваций за 2014 ГОД.

Литература

1. <http://robotforum.ru>
2. <http://www.fanuc.com>
3. <http://elec.ru>
4. <http://www.kawasakirobotics.com>
5. <http://wikipedia.org/wiki>
6. <http://www.belfingroup.com>
7. <http://grabcad.com>
8. <http://alfa-pet.ru>

УДК 631.3.004

УСТРАНЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ

Данила Александрович Пилин

Студент 4 курса

кафедра «Технологии обработки материалов»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.А. Денисов

кандидат технических наук, доцент ФГБНУ ГОСНИТИ

Представлена новая технология восстановления гильз цилиндров на примере дизельных двигателей MAN и Caterpillar с локальными дефектами рабочей поверхности типа задиры, риски, царапины и кольцевые износы в зоне верхнего компрессионного кольца применением

электроискровой обработки. Восстановление дефектной поверхности осуществляется путем локального нанесения электроискрового композиционного покрытия необходимой толщины.

Ключевые слова: гильза цилиндра, восстановление деталей; электроискровая обработка, финишная антифрикционная безабразивная обработка.

Межремонтный ресурс деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) не превышает 40 % от ресурса двигателя и, соответственно, требует периодической замены в процессе эксплуатации [1].

В условиях изменившейся структуры отечественного парка автотракторной техники, то есть, роста его разномарочности и уменьшения числа крупных предприятий с большой программой ремонта, а также изменившейся структуры ремонта, когда превалирует индивидуальный ремонт на специализированных участках, на постах и в мастерских, актуальность приобретают универсальные мобильные технологии восстановления деталей с применением современных инновационных энергосберегающих методов. Часто зарубежная техника, поступающая на отечественный рынок, не комплектуется требуемой нормативной документацией по эксплуатации и техническому обслуживанию, или эксплуатационники не успевают с нею ознакомиться из-за значительной разномарочности парка предприятия. В этих условиях растет число аварийных дефектов базовых деталей двигателя (до 5...10%), проявляющихся в виде внезапных отказов в период до наступления плановых сроков его ремонта. К таким аварийным дефектам можно отнести локальные дефекты рабочей поверхности гильз цилиндров типа задиры, риски и кольцевые износы в зоне верхнего компрессионного кольца.

Анализ методов восстановления гильз цилиндров дизельных двигателей показал значительное их разнообразие на рынке предложений [1-3]. К ним относятся: обработка в ремонтный размер расточкой и/или шлифованием, постановка дополнительной ремонтной детали; термопластическое деформирование, индукционная центробежная наплавка, контактная приварка стальной ленты, электродуговая металлизация, хромирование, железнение и т.д. В условиях современного ремонтного производства главной причиной, сдерживающей широкое распространение этих методов, является высокая трудоемкость и стоимость, требующие больших программ восстановления гильз цилиндров одного размера (более 40000 штук в год). В этой связи разработка недорогих, производительных, технологичных и универсальных методов и технологий восстановления гильз цилиндров является актуальной задачей ремонтного производства.

В ФБГНУ ГОСНИТИ разработана инновационная технология восстановления гильз цилиндров с локальными дефектами рабочей поверхности типа задиры, риски и кольцевые износы в зоне верхнего компрессионного кольца. Технология предусматривает применение метода электроискровой обработки дефектной поверхности гильзы с созданием многослойного композиционного покрытия требуемой толщины, последующего хонингования (расточки) и финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) с использованием переналаживаемой специализированной технологической оснастки с приводом от электро- или пневмодрели.

Технология восстановления гильз цилиндров электроискровыми композиционными материалами обладает следующими преимуществами:

- не предполагает значительных первоначальных затрат на внедрение, что позволяет ее использование в условиях небольших ремонтных предприятий, в ремонтных мастерских и на участках;

- обеспечивает ресурс восстановленных гильз на уровне новых;

- позволяет производить восстановление гильз без полной разборки двигателя;

- обеспечивает быстрый период приработки пары гильза – поршневое кольцо.

Данный способ восстановления легко механизмуется в крупносерийном производстве, а также применим при ручной обработке при восстановлении небольшого количества деталей.

Восстановление дефектной поверхности осуществляется путем локального нанесения электроискрового (ЭИ) покрытия необходимой толщины только на изношенную или поврежденную поверхность гильзы

Гильзы цилиндров с типовыми локальными дефектами рабочей поверхности представлены на рисунках 1 и 2. В зоне верхнего компрессионного кольца образуется кольцевой износ гильзы (рисунок 1) шириной до 20...25 мм и глубиной до 0,1 мм. Типовой задиры поверхности гильзы в результате разрушения верхнего компрессионного поршневого кольца показан на рисунке 2. Его глубина составила 0,4 мм, ширина 5 мм и высота 30 мм.

Устранение указанных дефектов производилось методом локальной электроискровой обработки поверхности на установке типа БИГ-4 электродами из бронзы БрКМц3-1 и меди М1.



Рис. 1. Кольцевой износ гильзы цилиндров MAN в зоне верхнего компрессионного кольца



Рис. 2. Задиры гильзы цилиндра CAT-3116 после поломки поршневого кольца

На рисунках 3 и 4 представлены гильзы цилиндров с электроискровыми композиционными покрытиями.

Время устранения задира (без механической обработки) составило до 15 мин., а затраты на электродные материалы и электроэнергию не превысили 100 руб.



Рис. 3. Гильза цилиндров с композиционным электроискровым покрытием зоны кольцевого износа



Рис. 4. Гильза цилиндров CAT-3116 с композиционным покрытием в зоне задира от сломанного кольца

Окончательная обработка рабочей поверхности гильзы производится при помощи разработанного в ФГБНУ ГОСНИТИ универсального устройства для хонингования (расточки) и финишной антифрикционной безабразивной обработки (рисунок 5). Такое устройство может

применяться в качестве хона (хонинговальной головки), которое не исправляет геометрической формы гильзы, а лишь повышает класс чистоты ее поверхности или может применяться для создания антифрикционного покрытия на зеркале гильзы.



Рис. 5. Хонингование гильз цилиндров с использованием универсальной технологической оснастки

Обработка гильз цилиндров с использованием указанного устройства может производиться на хонинговальном станке типа ЗБ833 (рисунок 5) или с использованием ручной электрической или пневматической дрели. Восстановленная рабочая поверхность гильзы цилиндров обрабатывается до шероховатости не более $Ra=0,32$ мкм.

Литература

1. *Живогин А.А.* Восстановление гильз цилиндров дизельных двигателей Сельскохозяйственной техники композитным покрытием на основе железа – Кандидатская диссертация.- Воронеж, ФГТО ВПО ВГТУ, 2014.-174с.
2. *Черноиванов В.И., Андреев В.П.* Восстановление деталей сельскохозяйственных машин. – М.: Колос, 1983. – 228 с.
3. *Иванов В.П., Лялякин В.П.* Восстановление деталей машин. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.

УДК 621.9

ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДОЛОТ СЕЯЛКИ PRIMERA DMC 9000 ФИРМЫ AMAZONE

Максим Николаевич Толкачев

Студент 4 курса

кафедра «Технологии обработки материалов»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Д.Б. Слинко

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов»

Износ рабочих долот является общей проблемой для всех современных почвообрабатывающих и посевных машин. В настоящее время долото является самым распространенным типом рабочего органа данных машин с анкерными и дисковыми сошниками. В процессе эксплуатации долота подвергаются интенсивному износу, при этом определяющим следствием износа является не столько увеличение тягового сопротивления и соответствующее увеличение расхода топлива, сколько ухудшение качества заделки семян и, как следствие, снижение урожайности. Несмотря на то, что конструкция сменного долота достаточно проста, замена комплекта долот, например для сеялки DMC 9000 с 48 долотами (рис. 1), обходится не дешево (ориентировочно 4500 - 5000 €). Учитывая реализованное производителем количество сеялок в России, особенности их эксплуатации, значительную (до 10000 га) сезонную наработку на один почвообрабатывающий агрегат и стоимость обслуживания, вопрос долговечности долот сошника сеялки DMC 9000 является актуальным [1].



Рис. 1. Долото сеялки Primera DMC 9000

Цель данной работы – восстановление и продление ресурса изношенных и новых деталей типа «долото». Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучение условий работы детали и дефектов, определяющих ее ресурс работы.
2. Выбор рациональных методов восстановления и упрочнения детали типа «долото».
3. Подбор оборудования и оснастки с их необходимой доработкой для реализации выбранных методов.
4. Исследование материалов для получения износостойких покрытий и режимов их нанесения, обеспечивающих повышение износостойкости детали.
5. Разработка технологических процессов восстановления и упрочнения детали.

Долото работает в непосредственном контакте с почвой, из-за чего возникает его сильный контактно-абразивный износ. Основными изнашиваемыми поверхностями долота являются фас и боковые поверхности (рис. 2).

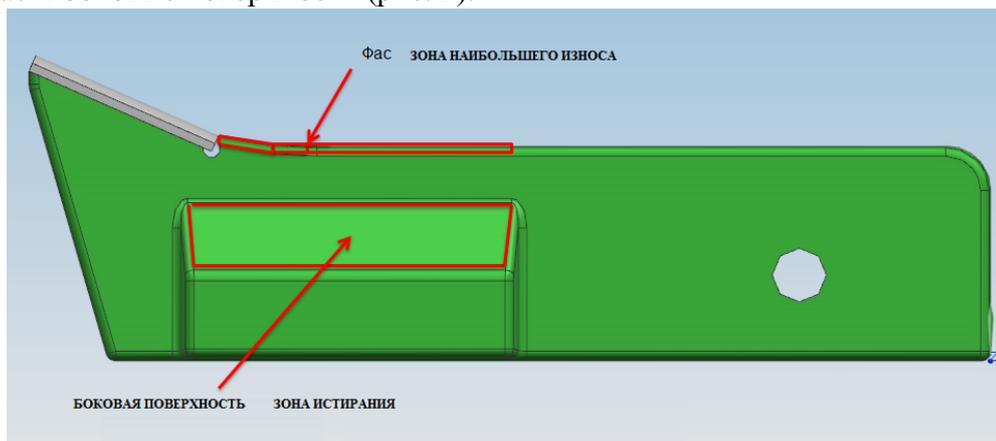


Рис. 2. Зоны износа долота сеялки

Исходя из условий работы, износов и анализа методов и полевых испытаний, для повышения износостойкости детали типа «долото» были исследованы следующие способы:

- 1) электроискровое нанесение покрытий на фас и боковые поверхности долот;
- 2) закалка и наплавка зон упрочнения токами высокой частоты (ТВЧ).

При восстановлении долота перед упрочнением производится наплавка изношенных поверхностей с использованием ТВЧ установки.

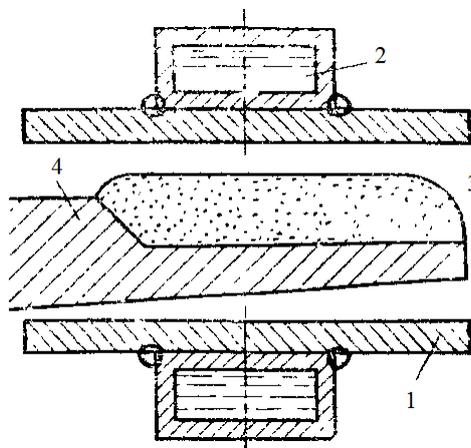


Рис. 3. Схема индукционной наплавки, где 1-индуктор, 2-вода для охлаждения индуктора, 3-наплавочный материал, 4-наплавляемая деталь

Сущность индукционной наплавки заключается в следующем (рис. 3). Наплавляемую деталь 4 помещают в электромагнитное поле индуктора 1, который питается переменным током высокой частоты (ТВЧ). В массе металла детали или компактной присадки индуктируются вторичные переменные токи той же частоты, распределяющиеся в поверхностном слое металла и нагревающие этот слой. Чем выше частота тока, тем тоньше нагреваемый слой металла. Для стальных деталей преимущественный нагрев токами высокой частоты поверхностных слоев металла сохраняется вплоть до точки Кюри (768 °С). После того, как металл нагреется выше точки Кюри, глубина проникновения индуктированных токов увеличивается в 10-20 раз (в зависимости от частоты), благодаря чему распределение температуры в нагреваемом металле становится более равномерным. Детали или компактные присадки нагревают до плавления металла и соединяют. Для предохранения от окисления и улучшения сплавления основного и наплавленного металлов применяют флюсы.

Для удержания порошковых материалов при ТВЧ нагреве и расплавлении на фесе долота и его боковых поверхностях, снижения расхода шихты и формировании качественного наплавленного слоя использовалась расходуемая технологическая оснастка (рис. 4) в виде асбестового шнура диаметром 1,5-2 мм, закрепляемого на упрочняемом участке этой поверхности с помощью жидкого стекла. После сушки заготовки на упрочняемой поверхности образуется подобие бортов, удерживающих наплавляемый материал до тех пор, пока процесс не закончится.



Рис. 4. Расходуемая технологическая оснастка
для удержания порошковых материалов на передней части долота

Для нанесения упрочненного слоя на боковые поверхности и фас применялся метод электроискрового нанесения покрытий (рис. 5), или электроискрового легирования (ЭИЛ). Данный метод применяется для упрочнения поверхностей деталей, подвергающихся изнашиванию при трении без смазочного материала (или с его небольшим количеством) с большими удельными давлениями, а также в условиях активной эрозии.

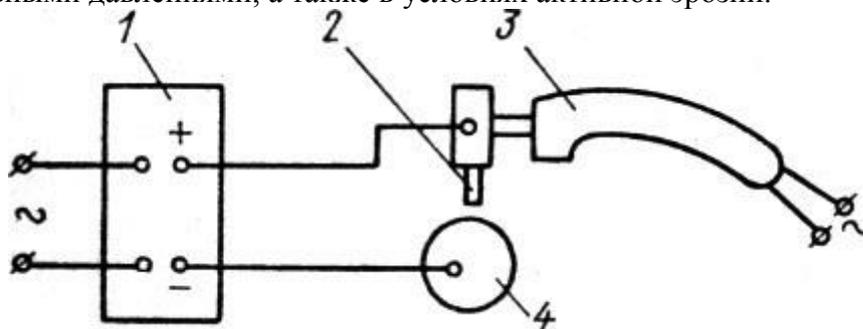


Рис. 5. Схема ЭИЛ, где 1-генератор импульсов, 2-легирующий электрод, 3-электромагнитный вибратор, 4-деталь

Нанесение упрочняющего покрытия происходит при электроискровом разряде между электродом 2 из упрочняющего материала и поверхностью детали 4. При этом в качестве упрочняющих материалов используются высоколегированные стали, твердые сплавы, графит, феррохром и др. Для электроискрового упрочнения используют как ручные, так и автоматизированные головки 3 с закрепленным неподвижно или вибрирующим электродом из легирующего материала.

При электроискровом легировании для упрочнения инструмента и технологической оснастки в качестве электродов применяют твердые сплавы (Т15К6, Т17К12, ВК4,6,8 и др.), материалы на основе карбидов и боридов металлов, графит и др. Инструмент и детали технологической оснастки подвергаются этому упрочнению после заточки и доводки, другие типы деталей - после очистки поверхности.

Для увеличения глубины упрочняющего слоя, нанесенного методом ЭИЛ, используется индукционная закалка. Так как материал долота (сталь 17Г1С) относится к малоуглеродистым сталям ($C < 0,2 \%$), то перед нанесением упрочняющего слоя на изнашиваемые поверхности наносился слой графита методом ЭИЛ.

Температура закалки такой стали не должна превышать $950 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость нагрева - $200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ и выше (реализуется при ТВЧ-нагреве), закалочная среда - вода, горячая вода, солевые растворы.

В результате проведенных исследований были выбраны наплавочные материалы и отработаны оптимальные режимы их нанесения на изнашивающиеся поверхности долота.

Использование метода ТВЧ наплавки и ТВЧ закалки позволяет нам проводить их на одной установке. Обработка технологии проводилась на установке индукционного нагрева СВЧ 40-АВ (рис. 6), состоящей из генератора и индукционной катушки - индуктора. Предусмотрена система охлаждения силовых элементов генератора и индукционной катушки.



Рис.6. Установка СВЧ-40АВ

Режимы работы при индукционной наплавке:

Ток, А - 40-45

Температура, С - 1100-1200

Время нагрева, мин - 3-4

Режимы работы при закалке:

Ток, А - 40-45

Температура, °С - 850-900

Время нагрева, мин - 0,5-1

Закалка в солевом растворе, с - 3-5

Для наплавки изношенных боковых поверхностей и фаса долота применялся плоский односторонний индуктор с воздушно-охлаждаемым ферритовым экраном (рис. 7) для концентрации высокочастотного электромагнитного поля на локальных плоских участках поверхности детали.



Рис. 7. Плоский односторонний индуктор для наплавки долота

Специальная форма этого индуктора обеспечивает наиболее равномерный и быстрый нагрев необходимого элемента или части плоской поверхности детали. Индуктор может использоваться для локальной поверхностной закалки или наплавки твердосплавных пластин, а при обеспечении относительного перемещения вдоль поверхности детали и для реализации высокопроизводительного непрерывно-последовательного способа ТВЧ-наплавки. При

восстановлении долота сеялки DMC 9000 с помощью этого индуктора возможен ТВЧ-нагрев его фаса и боковых поверхностей.

Для закалки долота необходимо было разработать отдельный индуктор, так как долото имеет паяную пластину, и его объемная закалка принципиально невозможна из-за вероятности ее распайки. С учетом вышесказанного, для выполнения ТВЧ-закалки долота был разработан двухпетлевой соленоидный индуктор для ТВЧ-нагрева под местную закалку в изнашиваемых зонах (рис. 8).



Рис.8. Индуктор для закалки после нанесения покрытия

Индуктор снабжен диэлектрической теплоизоляцией, выполненной плетеным стеклотканевым рукавом, его рабочие поверхности располагаются на расстоянии 10-15 мм от заготовки, конструкция индуктора и форма рабочей зоны позволяют обеспечить автоматизированное перемещение в нем заготовки с обеих сторон или на проход.

Для реализации метода ЭИЛ использовалась установка Элитрон-52Б для упрочнения деталей почвообрабатывающей и другой техники [2].

Режимы работы:

Частота вибраций, Гц -50-100

Ток короткого замыкания, А - 3,5-4,5

Рабочий ток, А - 1-1,5

Скорость перемещения электрода, см/мин - 7-10

Материал, используемый для электроискрового нанесения на боковые поверхности и фас - легирующий электрод из спеченного порошка BK15, химический состав которого, % - WC (карбид вольфрама) – 85, Со (кобальт) – 15. Твердость, HRC - 60-65.

Выбранный комбинированный метод восстановления и упрочнения долот (наплавка ТВЧ изношенных поверхностей с последующим их упрочнением методом электроискрового легирования) является оптимальным, так как позволяет значительно повысить износостойкость долот (в 1,5 – 2 раза) и снизить затраты материалов и электроэнергии на их восстановление и упрочнение. Упрочнение нового долота составляет 9-10 минут, расход энергии на одно долото – 2,04 – 2,05 кВт. Кроме того, применение этой технологии возможно для многократного восстановления изношенных долот.

Литература

1. *Драйер Х.* Детальное рассмотрение сошника сеялки Primera DMC: информационная страничка к сеялке Primera DMC.
2. *Иванов В.И.* Электроискровые упрочняющие технологии в машиностроении - М.: ГОСНИТИ, 2005. – 15 с.