

УДК 621.9.029: 621.771.07

## РЕМОНТ ВАЛКОВ ПРОКАТНОГО СТАНА

Бодарева Анастасия Вячеславовна

*Студентка 5 курса,*

*Кафедра «Реновация средств и объектов материального производства в машиностроении»*

*Московский Государственный Технический Университет*

*Научный руководитель: В.К.Стратьев,*

*Кандидат технических наук, доцент кафедры «Реновация средств и объектов материального производства в машиностроении»*

Работоспособность деталей машин непосредственно связана с состоянием их поверхностного слоя. При эксплуатации детали взаимодействуют друг с другом или с окружающей средой. Это приводит к изменению геометрических параметров детали, ухудшению эксплуатационных свойств поверхностного слоя и, как следствие, к потере работоспособности детали.

Реновационные технологии, способные восстановить как размеры деталей, так и свойства их поверхностного слоя позволяют значительно сократить себестоимость ремонта узлов и агрегатов, поскольку затраты на восстановление изношенных деталей в большинстве случаев значительно ниже затрат на изготовление новых. Рассмотрим процесс восстановления рабочих валков прокатного стана- комплекса машин и агрегатов, предназначенных для осуществления пластической деформации металла.

Процесс деформации происходит непосредственно в рабочих валках, вращающихся в подшипниках, установленных в рабочих (задающих) клетях, поэтому валки считаются наиболее изнашиваемым элементом прокатного стана.

К качеству валков предъявляют высокие требования т.к вращающиеся валки воспринимают давление, возникающее при обжатии металла, и передают это давление на подшипники. Валки представляют собой ступенчатый вал, имеющие рабочую поверхность - бочку диаметром 140мм. и опорные поверхности – шейки, диаметром 60 мм, на которые устанавливаются подшипники качения.

Практика показывает, что самым изнашиваемым элементом задающей клетки является узел конструкции задающего валка, в частности бочка валка и опорные поверхности – шейки под посадку подшипников, которые так и не вырабатывают свой ресурс за период работы.

Развитие, совершенствование существующих реновационных технологий и создание новых технологических методов восстановления

изношенных деталей машин является актуальной научно-технической задачей.

Под восстановлением понимается комплекс технологических операций, которые возвращают геометрические и физико-механические параметры поверхностного слоя детали и в целом ее работоспособности на уровне ничуть не уступающем новым деталям.

Основными требованиями к методам восстановления деталей машин можно назвать следующие:

восстановленные детали должны обладать исходными или лучшими эксплуатационными свойствами по сравнению с новыми, т.е. при восстановлении желательно использовать упрочняющие технологии;

технологические процессы восстановления должны позволять их автоматизацию и разработку соответствующего оборудования;

процессы восстановления должны обеспечивать минимальные затраты (на материалы, механическую обработку и т.д.), т.е. должны преимущественно использоваться энергосберегающие и безотходные технологии.

В отечественной и мировой практике известны десятки способов восстановления изношенных деталей машин. Учитывая возможные комбинации этих методов между собой и с дополнительными способами упрочнения и размерной обработки, вариации их применения (кинематические схемы, используемые материалы и их состояние, режимные факторы, ноу-хау и т.д.) можно констатировать, что подвидов реновационных технологий, по крайней мере, несколько сотен.

Рассмотрим один из возможных методов восстановления изношенных валков прокатного стана – метод деформирующего резания (ДР).

Метод деформирующего резания основан на подрезании и пластическом деформировании подрезанных слоев с образованием рельефа в виде оребрения. В процессе обработки не образуется стружка. Метод ДР может быть использован при восстановлении размеров деталей как самостоятельный технологический прием. В этом случае увеличение диаметральных или линейных размеров деталей при обработке методом ДР заключается в перераспределении материала поверхностного слоя за счет создания открытой регулярной пористости в виде узких глубоких канавок в поверхностном слое детали при формировании оребрения. Для стальных валов диаметр может быть увеличен до 0,8 мм. Ширина канавок для сталей составляет от 10 мкм до 0,5 мм. Шаг оребрения - от 0,15 до 2 мм, глубина канавок - от 0,2 до 2,0 мм. Канавки могут быть наклонные. В этом случае они будут выполнять роль анкерного замка для покрытия, наносимого на такую поверхность. Производительность, стоимость инструмента и операции практически не отличаются от обычной механической обработки. Например, время получения оребрения на валу диаметром 190 мм, с длиной участка 200 мм составляет около 3 минут.

Нанесение покрытий является наиболее распространенным в промышленности методом восстановления размеров и свойств изношенных

деталей машин. Широкое применение покрытий обусловлено их высокой эффективностью, относительно низкой стоимостью и возможностью нанесения различных материалов, в том числе керамических.

Низкая прочность связи покрытия с металлической основой является проблемой при нанесении керамических или металлокерамических материалов, свойства которых имеют значительное отличие от характеристик основы по таким показателям как коэффициент термического расширения, твердость, модуль упругости и др. В то же время именно керамические и металлокерамические покрытия обладают наилучшим комплексом свойств, обеспечивающих высокие эксплуатационные показатели деталей машин.

Очевидно, что макрорельеф, получаемый ДР, который многократно увеличивает площадь поверхности детали после обработки и позволяет реализовать анкерный эффект удержания покрытия, является перспективным для последующих газотермических способов нанесения покрытий. Покрытия, наносимые на оребренную поверхность, могут заполнять межреберный зазор полностью или частично. Оребренная структура с незаполненным межреберным промежутком является демпфирующим слоем между основой детали и формируемым покрытием. Наличие демпфирующего слоя наиболее актуально для сочетания "материал покрытия - материал детали" с резко отличающимися характеристиками, т.е., в первую очередь, для керамических и твердосплавных покрытий на металлических деталях. Частичное заполнение покрытий достигается либо за счет наклонного оребрения, либо установкой сопла, наносящего покрытие, не перпендикулярно напыляемой поверхности, либо соответствующим выбором зернистости напыляемого порошка.

При анализе возможности использования метода ДР в случае нанесения ремонтных составов очевидно, что подготовка поверхности под нанесение ремонтных составов с формированием развитого макрорельефа, также как и для газотермических покрытий, позволит устранить такой недостаток этого метода восстановления, как низкая прочность связи покрытия с основным материалом детали.

Методы химико-термической обработки позволяют существенно повысить эксплуатационные характеристики поверхностного слоя, однако максимальное увеличение размеров для ХТО составляет 0,2 мм (борирование, алитирование). Обычно характерное увеличение размеров составляет 5...50 мкм, что существенно ограничивает использование методов ХТО для восстановления размеров изношенных деталей машин. Комбинация метода ДР и ХТО позволяет не только существенно повысить эксплуатационные характеристики деталей машин, но и восстанавливать размеры изношенных деталей.

Поверхностная пористость на детали после ДР, в большинстве случаев, является негативным явлением, т.к. уменьшает площадь ее несущей поверхности, однако для дорогостоящих деталей даже частичное восстановление их служебных свойств может быть экономически целесообразным.

Материал ребер, образованных в процессе ДР значительно упрочнен и имеет твердость и прочность в 1,3...1,7 раза больше по сравнению с твердостью и прочностью основного материала, поэтому можно высказать предположение, что уменьшение несущей способности поверхности восстановленной методом ДР детали будет частично или полностью компенсироваться более высокими механическими характеристиками материала поверхностного слоя.

В некоторых случаях регулярная открытая поверхностная пористость может служить положительным фактором, например, для удержания и подвода смазки, а также для сбора продуктов износа, например, в узлах трения скольжения. Остаточная пористость в виде узких щелевых канавок может служить также объемом для размещения твердых смазок (медь, олово, дисульфид молибдена, фторопласт), так же как порошковых или проволочных материалов повышенной твердости и износостойкости.

Пористость поверхности после ДР также может играть положительную роль, например, если восстановленная деталь в дальнейшем будет иметь посадку с натягом, то возможность пластического деформирования ребер позволяет в несколько раз увеличить допуск на размер сопрягаемых деталей.

Минимальная величина пористости для ребер, перпендикулярных основанию, составляет около 23%, т.е. несущая способность восстановленной поверхности после полного удаления заострений вершин составит около 77%, что во многих случаях является недопустимым.

Оценка работоспособности проводилась для деталей, восстановленных только с использованием метода ДР, а также для деталей с последующим нанесением покрытий на поверхность, подготовленную методом ДР и для образцов с разным углом наклона профиля.

Эта оценка восстановленных валов (сталь 40Х, твердость 220 НВ) под последующее соединение с натягом производилась путем сравнения усилий запрессовки-выпрессовки восстановленных валов в подшипник 1305 с натягом 20 мкм.

Испытывались варианты с заполнением межреберного зазора ремонтным составом "Belzona-суперметалл", а также оребренная поверхность, полученная методом ДР без заполнения межреберного пространства. Варианты восстановленных по методу ДР поверхностей выполнены на одном валу (рис 1). Окончательный размер всех участков получен на круглошлифовальном станке модели 3А110 с одного установа.

Поверхность №1 сформирована методом ДР с последующим удалением треугольных заострений ребер шлифованием; межреберный зазор ничем не заполнялся.

Поверхность №2 имела оребрение с острыми вершинами ребер и с заполнением межреберного пространства ремонтным составом "Belzona-суперметалл".

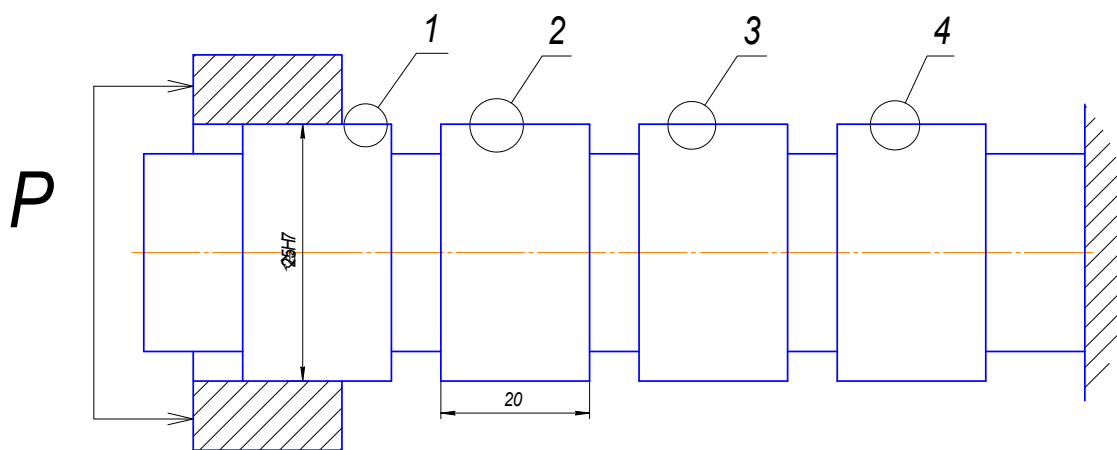


Рис.1 Варианты восстановленных поверхностей.

Поверхность №4 аналогична поверхности №1, но с заполнением межреберного пространства ремонтным составом "Belzona-суперметалл".

Базовым вариантом для сравнения являлся участок гладкого вала (поверхность №3).

Шаг оребрения, равный 0,7 мм, и толщина ребра, составляющая 0,46 мм одинаковы для всех вариантов оребренных структур.

Испытания проводились на токарном станке 16К20. Усилие создавалось задней бабкой станка и прикладывалось по оси вала с упором втулки в кулачки патрона. Измерение усилий производилось образцовым динамометром ДС-3. Запрессовка - выпрессовка производилась десятикратно.

Экспериментальные данные показывают, что при прочих равных условиях усилие, как запрессовки, так и выпрессовки для поверхности №1 (оребренная с сошлифованными вершинами ребер) больше в 1,6...2,3 раза аналогичных усилий запрессовки-выпрессовки по сравнению с базовой (гладкой) поверхностью №3. Усилие запрессовки-выпрессовки втулки по оребренным поверхностям с заполнением межреберного пространства ремонтным составом "Belzona" 1,4...3 раза меньше по сравнению с базовой поверхностью №3.

Выявленный факт значительного повышения усилия запрессовки-выпрессовки при посадке с натягом гладкой втулки по валу по сравнению с оребренной структурой может иметь практическое значение не только для деталей, подлежащих восстановлению, но и для новых деталей, работающих в неразъемных соединениях, воспринимающих осевые нагрузки.

Механизм повышения осевых нагрузок неразъемного соединения, одна из деталей которого имеет макрорельеф в виде оребрения можно объяснить следующим образом. При движении с натягом втулки относительно оребренной поверхности вала, возникающие на вершине ребра силы трения упруго изгибают ребро. Такой изгиб ребра приводит к его самозаклиниванию, поскольку при упругом повороте ребра увеличивается диаметральный размер вала. Заполнение межреберных зазоров делает невозможным изгибные деформации ребра и приводит к устранению эффекта самозаклинивания ребер. Снижение усилий запрессовки-

выпрессовки оребренных поверхностей с заполненным ремонтным составом межреберным пространством можно объяснить антифрикционным свойством ремонтного состава "Belzona-суперметалл".

Незначительное снижение усилий запрессовки-выпрессовки (с 1311 кГ до 1083 кГ) при их десятикратном повторении, а также малая величина уменьшения диаметрального размера после испытаний (на 3 мкм) для участка вала №1 свидетельствует об отсутствии пластических деформаций ребер, т.е. ребра при нагружении работают в области упругих деформаций.

При восстановлении изношенных поверхностей методом ДР с большими величинами износа, или где недопустимо наличие поверхностной пористости, целесообразно применение ремонтных состав.

Оценка прочности сцепления металлополимерного покрытия "Belzona-суперметалл", нанесенного на оребренную поверхность, сформированную ДР, проведена также путем сравнительных испытаний покрытий на сдвиг. Сравнение проводилось с аналогичным покрытием, нанесенным на поверхность, подготовленную по одной из штатных технологий подготовки поверхности (нарезание резьбовых канавок с шагом 1,4 мм и высотой профиля 0,5 мм с последующей пескоструйной обработкой). На предельные сдвигающие усилия были также испытаны оребренные поверхности с заполнением межреберного зазора компаундом "Belzona-суперметалл" и без заполнения.

Участок №1 вала имел оребренную структуру, сформированную методом ДР. Заполнения межреберного зазора не производилось. Шаг оребрения составлял 0,7 мм, ширина канавок составляла 0,24 мм, глубина канавок - 1,42 мм.

Участок №2 имел параметры оребрения, аналогичные участку №1, межреберное пространство заполнялось ремонтным составом "Belzona-суперметалл". Следует отметить, что вершины ребер, находящиеся на поверхности вала, не сошлифовывались и имели размер по диаметру обеспечивающий натяг 0,7 мм. Параметры оребрения такие же, что и для участка №1.

Участок вала №3 являлся базовым и использовался для сравнения. Перед нанесением ремонтного состава "Belzona-суперметалл" на этот участок вала использовалась штатная технология подготовки поверхности, заключающаяся в нарезании резьбовых канавок с шагом 1,4 мм и высотой профиля 0,5 мм. Толщина наносимого покрытия составляла 2,5 мм от верхней части выступов резьбового профиля.

Ремонтный состав на участке №4 наносился на оребрение, полученное методом ДР. Толщина покрытия над вершинами ребер составляла также, - 2,5 мм. Параметры оребрения одинаковы с параметрами оребрения участка №1.

Оценка прочности сцепления покрытия осуществлялась по усилию запрессовки вала во втулку, имеющую меньший на 0,7 мм диаметр, по сравнению с диаметром испытываемых участков вала. Испытания производились на гидравлическом прессе модели П10 с развиваемой

нагрузкой до 10 тонн. Регистрация усилия запрессовки производилась по величине давления масла в рабочем гидроцилиндре прессы.

Разрушающее усилие при испытаниях покрытий на сдвиг составило:

поверхность №1 – 1620 кГ,

поверхность №2 – 5100 кГ.

поверхность №3 (базовая) – 1590 кГ,

поверхность №4 – 2100 кГ.

Усилие разрушения покрытия на сдвиг для второй поверхности (оребренная структура с заполненным межреберным пространством ремонтным составом "Belzona-суперметалл") больше в 3,2 раза по сравнению с базовой (поверхность №3). Такие большие воспринимаемые усилия можно объяснить композиционной структурой покрытия, в которой роль армирующих элементов выполняют ребра, при этом ремонтный состав в межреберном зазоре работает не на сдвиг, а только на сжатие. Как отмечалось выше, ремонтные составы имеют предел прочности на сжатие в 5 раз больший, чем на сдвиг. Именно в этом варианте ремонтный состав испытывал только сжимающие усилия.

Восстановленная поверхность №4 с подготовкой методом ДР под нанесение ремонтного состава показала повышение разрушающих покрытие сдвиговых усилий на 30% по сравнению с базовым участком, что свидетельствует о большей прочности сцепления покрытия с поверхностью сформированной ДР, чем с поверхностью, подготовленной по базовой технологии.

Практически одинаковые усилия на срез, полученные на поверхностях №1 и №3, позволяют в случае небольших величин восстанавливаемых размеров, отказаться от применения дорогостоящих ремонтных составов и ограничиться только процессом ДР.

Объединение возможностей метода ДР и высоких эксплуатационных показателей композиционных составов фирмы "Belzona" позволило не только значительно улучшить характеристики восстанавливаемых деталей, но и повысить технологичность и производительность восстановительных работ.

К таким технологическим преимуществам можно отнести следующие:

не требуются операции пескоструйной обработки и обезжиривания поверхности, необходимые перед нанесением ремонтных составов, поскольку после процесса ДР практически вся поверхность детали ювенильно чистая;

возможна существенная экономия ремонтного состава и повышение удобства его нанесения за счет надежного базирования наносящего пасту инструмента по вершинам ребер.

Одним из сдерживающих факторов широкого использования газотермических методов нанесения покрытий также является недостаточно высокие показатели прочности и надежности связи покрытия с основным материалом детали. Метод ДР, как средство подготовки поверхности, позволяет получать глубокий регулярный макрорельеф в виде ребер с возможностью регулирования их высоты, шага или наклона.

Сравнительные испытания восстановленной поверхности на срез были проведены для плазменнонапыленного металлического (латунь Л63) покрытия, нанесенного на поверхность после обработки ДР. Сравнение производилось с поверхностью, подготовленной методом нарезания резьбы треугольного профиля. Рельеф, полученный ДР, кардинально меняет картину механизма отслоения напыляемого материала от основы. При предельных сдвиговых нагрузках в случае подготовки поверхности в виде треугольной резьбы зафиксировано полное отслоение покрытия от поверхности детали. Прочность на сдвиг в этом случае составила 19 МПа. В случае подготовки поверхности методом ДР отслоения не происходит (прочность на сдвиг составила 23 МПа), покрытие не отслаивается, а разрушается по своей толщине. В данном случае фактором, определяющим прочность связи покрытия с основой, является не адгезионное взаимодействие, а механические характеристики самого покрытия. Канавки, полученные методом ДР, обеспечивают не только повышенную адгезионную, но и механическую связь покрытия с материалом основы за счет анкерного эффекта.

Проведена оценка повышения прочности сцепления при термоударных нагрузках плазменнонапыленного керамического покрытия ( $Al_2O_3$ ), нанесенного на поверхность стального вала, подготовленного под напыление методом ДР. Оребрение формировалось на цилиндрических образцах диаметром 25 мм длиной 150 мм из стали 40Х. Оптимизация геометрии оребрения производилась в два этапа. Критерием оптимизации являлось наибольшее количество выдержанных термоциклов до отслоения, либо появления визуально наблюдаемых трещин керамического покрытия при резком охлаждении вала с покрытием (погружение в воду) после нагрева до 1223 К. На первом этапе проводился предварительный анализ геометрии оребрения в диапазоне шагов 0,2...1,1 мм с высотой профиля от 0,3 до 2,0 мм. Количество типоразмеров оребрения на первом этапе испытаний составило 15 вариантов. Толщина плазменнонапыленного покрытия составляла 0,6 мм. Покрытие наносилось на установке плазменного напыления УПУ-3Д. Максимальный размер частиц напыляемого материала составлял 100 мкм.

По результатам испытаний на термоудар по первому этапу выбран диапазон типоразмеров оребрения для второго этапа оптимизации с шагами от 0,25 до 0,5 мм и высотой профиля от 0,11 до 0,75 мм.

Наибольшее количество термоциклов показала поверхность, подготовленная методом ДР с параметрами: шаг - 0,25 мм, глубина профиля оребрения - 0,38 мм, ширина канавки 0,09 мм. Покрытие на поверхности образца, подготовленного пескоструйной обработкой и черновым точением, выдержало не более 1...3 циклов нагрев-охлаждение, в то время как покрытие на поверхности, подготовленной методом ДР, выдержало 28 циклов.

Таким образом, метод ДР существенно повышает эксплуатационные характеристики получаемых покрытий и является перспективным также при подготовке поверхностей под плазменное напыление покрытий. Оценка работоспособности образцов с наклонным углом профиля (сталь 40Х,

твердость 220 НВ) под последующее соединение с натягом производилась путем сравнения усилий запрессовки-выпрессовки образцов в подшипник 1305 с натягом 20 мкм.

Из анализа результатов опыта видно, что прослеживается тенденция увеличения силы распрессовки по отношению к величине силы запрессовки и тенденция к уменьшению сил запрессовки – распрессовки с увеличением угла наклона профиля ребра.

Для обработки данных эксперимента по нанесению ремонтного состава был выполнен дробнофакторный экспериментДФЭ 24-1, был определен полином, четыре фактора, влияющих на процесс ДР.

**Таблица 1. Сравнительная характеристика режимов резания**

Материал	Сталь 45	Сталь 45
t, глубина	-1.5 ...-0.1	-1.5 ...-0.1
угол	39	42
S, шаг	0.5	0.5
Скорость V м/мин	0.6...1.2	0.6...1.2

Результатом эксперимента является значение диаметра полученного при оребрении. После окончательного подсчета всех коэффициентов уравнения регрессии и анализа данных можно заключить, что найден оптимальный режим деформирующего резания табл.1. По результатам проведенного дробнофакторного эксперимента можно сделать вывод, что наилучшим режимом для проведения процесса ДР будет режим со следующими значениями факторов: глубина  $x_1=1,1$  мм, угол наклона  $x_2=5$ , шаг оребрения  $x_3=2$ мм, скорость  $x_4=0.9$  м/мин.

Как уже указывалось ранее, ДР осуществляется на обычном токарном станке, в отличии от других способов восстановления, зачастую для них требуется дорогое оборудование или материалы.

Однако, фактором, существенно ограничивающим область использования ДР, является ограничение по твердости перед обработкой методом ДР. Твердость обрабатываемого материала должна быть не выше 240 НВ.

Для закаленных деталей, как в нашем случае, это накладывает требование обязательного проведения поверхностного или объемного разупрочнения (отжига) изношенной детали перед нанесением оребрения. Это обусловлено необходимостью повышения пластичности предварительно закаленных поверхностей таких деталей, что в свою очередь ведет к повышению себестоимости восстанавливаемой детали. Так как термообработка, особенно объемная, может привести к короблению и образованию дополнительных усталостных напряжений в детали.

## Основные выводы

### I. Метод ДР:

это самостоятельный технологический прием, позволяющий восстанавливать размеры изношенных деталей машин до 1,2 мм на диаметр; средство подготовки поверхности под последующую ХТО, или электроискровое легирование, поскольку после обработки методом ДР размеры детали увеличиваются значительно больше чем при этих видах обработки;

средство подготовки поверхности под нанесение газотермических покрытий, ремонтных составов или последующего эмалирования, поскольку развитый макрорельеф, полученный методом ДР, позволяет увеличить прочность сцепления материала покрытия с основным материалом детали;

средство подготовки поверхности под приваривание ленты, поскольку оребренная поверхность при этом обеспечивает большие температуры и давления в зоне контакта, чем гладкая поверхность и, как следствие, большую прочность связи ленты с основой.

В ходе экспериментов была разработана методика выбора углов инструмента в плане и режимов ДР для заданного увеличения линейных размеров восстанавливаемых деталей.

II. Выявлен эффект самозаклинивания оребренной методом ДР поверхности в сопрягаемых с натягом парах, который сопровождается увеличением усилия запрессовки-выпрессовки таких пар в 1,6...2,3 раза по сравнению с гладкой поверхностью.

III. Испытания покрытия на основе ремонтного состава "Belzona-суперметалл" на срез показали увеличение воспринимаемых покрытием сдвиговых нагрузок в 3,2 раза в случае подготовки поверхности методом ДР по сравнению с аналогичным покрытием, наносимым на поверхность, подготовленную по штатной технологии.

IV. Изменение угла наклона профиля ребра (90, 30, 60, 90, 120) выявляет тенденцию к уменьшению сил запрессовки-выпрессовки с увеличением угла наклона профиля.

## Литература

1. *Н.Н. Зубков, И.Г. Кременский, С.Г. Васильев.* Восстановление изношенных поверхностей с использованием металлорежущего оборудования. М.: Машиностроение, 2001. – 415 с.;
2. *Кудинов В.В.* Плазменные покрытия.– М.: Металлургия, 1977.– 184 с.;
3. «Восстановление исходных размеров и подготовка поверхностей под нанесение покрытий методом деформирующего резания» // Метро. – 1998г.
4. *П.Ф. Дунаев О.П. Леликов.* Учебник «Детали машин».