

УДК 621.777; 621.791.44

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРШНЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ.

Смирнов Дмитрий Павлович⁽¹⁾, Исамутдинова Кристина Руслановна⁽²⁾

Аспирант 2 года обучения (очная форма)⁽¹⁾, студент 4 курса⁽²⁾

Кафедра «Обработка материалов давлением»

ГОУ ВПО «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева»

Научный руководитель: Первов М. Л.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением»

Поршень – в тепловой машине – деталь, предназначенная для циклического восприятия давления расширяющихся газов и преобразования его в поступательное механическое движение, воспринимаемое далее кривошипно-шатунным механизмом.

Поршень – одна из важнейших деталей двигателя внутреннего сгорания. Он передает энергию сгорания топлива через палец и шатун коленчатому валу.

Во время работы на поршень действуют высокие механические и тепловые нагрузки. Максимальное давление в цилиндре, возникающее при сгорании топливно-воздушной смеси, может достигать 65 – 80 бар в бензиновом двигателе и 80 – 160 бар в дизеле.

Во время работы поршень совершает возвратно-поступательное движение, периодически ускоряясь до скорости более 100 км / час, а затем замедляясь до нуля. Такой цикл происходит с удвоенной частотой вращения коленчатого вала, то есть при 6000 оборотов в минуту цикл «ускорение – замедление» происходит с частотой 200 Гц. Максимальная величина ускорений, приходящаяся на верхнюю и нижнюю мертвые точки, может достигать 15000 – 20000 м / с², что соответствует перегрузке (1500 – 2000) g. От действия ускорений возникают инерционные силы по величине соизмеримые с теми, что действуют от давления при сгорании.

Сгорание топливовоздушной смеси происходит при температуре 1800–2600 °С. Эта температура значительно превышает температуру плавления поршневого сплава на основе алюминия (~700°С). Чтобы не расплавиться, поршень должен эффективно охлаждаться, передавая тепло от камеры сгорания через кольца, юбку, стенки цилиндра, палец и внутреннюю поверхность охлаждающей жидкости и масла. При нагревании поршня происходит снижение предела прочности материала, возникают термические

напряжения от перепадов температуры по его телу, которые накладываются на напряжения от сил давления газов и инерционных сил.

Таким образом, условия работы поршня можно определить как очень сложные.

Поршень подразделяется на три части, выполняющие различные функции: днище, уплотняющая часть и направляющая часть (юбка).

Днище и уплотняющая часть образуют головку поршня. В уплотняющей части поршня располагаются компрессионные и маслосъемные кольца. В некоторых конструкциях поршней из алюминиевых сплавов в его головку залит ободок из коррозионностойкого чугуна (нирезиста), в котором прорезана канавка для верхнего наиболее нагруженного компрессионного кольца. Нирезистовую вставку под верхнее поршневое кольцо имеют, в частности, поршни двигателей, выпускаемых ТМЗ (Тутаевский моторный завод). Благодаря этому значительно увеличивается износостойкость поршня. Кольцевые каналы для маслосъемных колец выполняются со сквозными отверстиями, через которые масло, снятое с зеркала цилиндра, поступает внутрь поршня и стекает в поддон картера двигателя.

Юбка поршня (тронк) является его направляющей частью при движении в цилиндре и имеет два прилива (бобышки) для установки поршневого пальца. Так как масса поршня у приливов оказывается большей, чем в других частях юбки, температурные деформации при нагреве в плоскости бобышек также будут наибольшими. Для снижения температурных напряжений поршня с двух сторон, где расположены бобышки, с поверхности юбки, удаляют металл на глубину 0,5-1,5 мм. Эти углубления, улучшающие смазывание поршня в цилиндре и препятствующие образованию задиров от температурных деформаций, называются "холодильниками".

При комнатной температуре юбки поршней должны иметь овально бочкообразную форму. Дело в том, что при разогреве двигателя до рабочих режимов поршень расширяется неравномерно (сильнее в области бобышек), поэтому из овального он становится круглым. Бочкообразная же форма нужна ему для создания масляного клина в месте контакта с гильзой цилиндра.

Подробности, связанные с конструктивными элементами поршней, позволят глубже понять сложность задач, стоящих перед производителями.

Головка поршня – это его верхняя часть, которая включает днище и зону канавок под поршневые кольца. На днище поршня действуют давление газов и тепло от сгорания топлива, поэтому его головка должна:

- обеспечивать хорошее смесеобразование и полноту сгорания топлива;
- сохранять прочность при высокой температуре;
- обеспечивать отвод тепла от днища;
- передавать усилие на поршневой палец и шатун через бобышки;
- обеспечивать заданный ресурс по износу канавок под поршневые кольца.

Для упрочнения головка алюминиевых поршней может быть анодирована (нанесено защитное окисное покрытие). В дизельных двигателях камера сгорания может быть упрочнена путем армирования металлокерамическим волокном в процессе литья под давлением.

Как известно, в большинстве двигателей внутреннего сгорания серийных автомобилей устанавливаются литые алюминиевые поршни. Они вполне удовлетворяют всем требованиям и выполняют свою работу на достаточно высоком уровне, однако, такие поршни имеют и принципиально неустранимые недостатки, среди которых высокая пористость материала, низкая устойчивость к ударным и тепловым нагрузкам, и, как следствие, недолговечность службы поршня.

Более дорогие кованные поршни (иногда называемые штампованными) имеют перед литыми ряд неоспоримых преимуществ: стойкость к тепловым и ударным нагрузкам, твердость, долговечность, надежность. Они устанавливаются, в основном, на спортивные двигатели, подвергающиеся высоким перегрузкам в процессе своей эксплуатации. Такие поршни служат в 4–5 раз дольше литых. Однако у них есть свой недостаток – сложность их изготовления и цена. Далеко не каждый специализированный завод может изготавливать действительно качественные кованные поршни для силовых агрегатов. Это связано не только с наличием высокоточного профессионального оборудования. Необходимо также иметь глубокие познания в области материаловедения и машиностроения.

В мире существует несколько технологий изготовления поршней для двигателей внутреннего сгорания. Наиболее распространенная из них – это литье в специальную металлическую форму (кокиль). Ее основной недостаток – высокая пористость материала получаемого изделия, связанная с выходом газов при остывании расплава металла. Это самый дешевый и наиболее приемлемый для крупносерийного производства метод. Существует и более дорогой вариант – литье под давлением. Качество поршней здесь несколько выше, чем при обычном литье, а структура материала изменяется незначительно.

Еще одна технология, похожая на литье под давлением, называется жидкой штамповкой. Прессовка производится несколько позже, чем при литье под давлением. Материал подвергается штамповке на стадии кристаллизации, при остывании расплава, когда часть металла уже стала твердой. Давление устраняет микрополости, что улучшает структуру материала поршня, а значит и свойства изделия. Жидкая штамповка удобна тем, что позволяет «залить» различные вставки и металлические детали. Она легко обеспечивает соединение тела поршня с другими металлами, например, с нирезистовыми вставками под верхнее компрессионное кольцо. Такие поршни в основном используются для дизельных двигателей, они более долговечны, выдерживают большие нагрузки. Лазерным наплавлением наносят дополнительные покрытия, которые в основном применяют при изготовлении поршней для спортивных и тюнингованных моторов.

Естественно, массовое производство этого не требует: зачем делать поршень, который прослужит дольше самого автомобиля?

Альтернатива методам литья – изотермическая штамповка твердой заготовки. В этом процессе заготовку поршня получают не отливкой расплавленного металла в кокиль, а формовкой под давлением не расплавленной, но сильно нагретой, легко деформируемой заготовки. Такие поршни в основном используют для тюнинга за рубежом. К примеру, именно по этой дорогой технологии делает свои эксклюзивные поршни известная фирма Mahle. Для создания таких прогрессивных и наукоемких технологий важны не столько оборудование, сколько глубокие знания в области материаловедения для обеспечения требуемой структуры и в области технологии машиностроения для оптимального проектирования формы изделия, являющейся важным фактором качества работы изделия в тех или иных условиях. Специалистами Московского автомеханического института (Государственный технический университет МАМИ) под руководством профессора И. Л. Федоренко были разработаны технологии и оборудование для производства разнообразных типов поршней. Такие детали, полученные методом изотермической штамповки, применяют многие профессионалы и тюнинг-ателье, занимающиеся форсированием и доводкой двигателей, спортивными автомобилями и мотоциклами.

К материалам, применяемым для изготовления поршней двигателей (например, автотракторных), предъявляются следующие требования:

- высокая механическая прочность;
- малая плотность;
- хорошая теплопроводность;
- малый коэффициент линейного расширения;
- высокая коррозионная стойкость;
- хорошие антифрикционные свойства.

Для изготовления поршней применяются серые чугуны и алюминиевые сплавы. Поршни из чугуна прочны и износостойки. Благодаря небольшому коэффициенту линейного расширения они могут работать с относительно малыми зазорами, обеспечивая хорошее уплотнение цилиндра. Однако чугун имеет довольно большой удельный вес. В связи с этим область применения чугунных поршней ограничивается сравнительно тихоходными двигателями, в которых силы инерции возвратно движущихся масс не превосходят одной шестой от силы давления газов на днище поршня. Чугун имеет низкую теплопроводность, поэтому нагрев днища у чугунных поршней достигает 350 – 400 °С. Такой нагрев нежелателен особенно в карбюраторных двигателях, так как он служит причиной возникновения детонации.

подавляющее большинство автомобильных двигателей имеют алюминиевые поршни. Достоинства алюминиевых поршней: малая масса (как минимум на 30 % меньше по сравнению с чугунными); высокая теплопроводность (в 3 – 4 раза выше теплопроводности чугуна), обеспечивающая нагрев днища поршня не более 250 °С, что способствует

лучшему наполнению цилиндров и позволяет повысить степень сжатия в бензиновых двигателях; хорошие антифрикционные свойства.

Недостатками алюминиевых поршней являются: большой коэффициент линейного расширения (примерно в два раза больше, чем у чугуна), значительное снижение механической прочности при нагреве (повышение температуры до 300 °С приводит к снижению механической прочности алюминия на 50 – 55 % против 10 % у чугуна).

Исходным материалом служат алюминиевые сплавы с большим содержанием кремния АК12Д и АК18Д, для дизелей применяют гранулированный сплав 1379П. Первый из них, разработанный для моторов военного назначения, сейчас широко применяют в гражданских двигателях. В этом доэвтектическом, как говорят специалисты, сплаве кремний растворен в металле равномерно, что улучшает качество изделия.

Состав сплава сильно влияет на характеристики поршней, его подбор для разных типов двигателей – отдельная исследовательская задача. К сожалению, отечественная цветная металлургия не может сегодня обеспечить такого широкого выбора специальных сплавов, как хотелось бы специалистам. Однако из имеющихся сплавов методомковки удастся сделать поршни, твердость которых в полтора – два раза выше, чем литых.

Не будет преувеличением сказать, что поршень – наиболее ответственная и специфичная деталь в современном двигателе. Он должен быть легким и прочным, способным выдерживать значительные механические нагрузки и тепловые удары, и, кроме того, обладать высокой износостойкостью рабочих поверхностей, низким трением при минимально возможном зазоре в цилиндре. Последнее требование особенно важно для хорошей герметичности, возможности избежать прорыва газов из камеры сгорания в картер и поступления масла в обратном направлении. Иными словами - для минимального расхода масла с одновременным отсутствием шума (стука) поршня о стенки.

Недопустимые для нормальной работы двигателя зазоры между стенками цилиндров и алюминиевыми поршнями устраняются конструктивными мероприятиями, основными из которых являются: придание юбке поршня овальной или овально-конусной формы; изоляция тронковой (направляющей) части поршня от наиболее нагретой его части (головки); косой разрез юбки по всей длине, обеспечивающий пружинящие свойства стенок; Т- и П-образные прорезы в юбке поршня не на полную ее длину в сочетании с ее овальностью; компенсационные вставки, ограничивающие тепловое расширение юбки в плоскости качания шатуна.

Две основные проблемы, решаемые при проектировании моторов: как избежать повышенного износа поршня, как избежать прогара поршня. Обе эти проблемы возникают вследствие желания конструкторов максимально облегчить поршень, поскольку это позволяет улучшить показатели моторов и компрессоров.

Чтобы поршень противостоял этим воздействиям, он должен быть легким, прочным, износостойким, хорошо проводить тепло. Все

перечисленные условия должны быть учтены при проектировании. Форма внутренних поверхностей и конструктивных элементов поршня должна обеспечивать заданную прочность и работоспособность за счет рационального распределения и использования материала.

Особое внимание уделено форме наружной поверхности. Внешний профиль боковой поверхности поршня формируется с учетом деформаций от механических нагрузений (давления газов и инерционных сил) и теплового воздействия от сгорания топливовоздушной смеси таким образом, чтобы ни при каких условиях не произошло заклинивание в цилиндре, прорыв горячих газов в картер, прогорание камеры сгорания.

Температура поршня в зоне камеры сгорания (на днище) выше, чем на юбке, температурное расширение головки больше чем юбки, поэтому поршень в холодном состоянии – бочкообразный, с уменьшением диаметра от юбки к головке.

Сила давления газов, силы инерции и боковая сила деформируют поршень так, что юбка овалируется. Для компенсации этой деформации поршень изначально выполняется с «противоэллипсом», большая ось которого расположена в перпендикулярно оси пальцевого отверстия.

Зазоры между поршнем и цилиндром должны быть сведены к минимуму для предотвращения шума, особенно в холодном двигателе. Но они должны быть достаточными для предотвращения заклинивания при работе прогретого двигателя.

И это только часть проблем, которые приходится решать при конструировании и производстве поршней для конкретных двигателей. В целом получается, что поршень, как бы концентрирует технические новшества, заложенные в конструкцию мотора.

В данной работе особое внимание отведено проблеме получения такого поршня, который бы по вышеперечисленным параметрам имел максимально лучшие показатели.

Таким образом, целью данной работы можно указать следующее: исследование возможности получения современного поршня минимального веса, имеющего достаточную прочность, низкий коэффициент линейного расширения и обладающего достаточно высокими тепловыми (для увеличения мощности двигателя за счёт повышения температур в камере сгорания) и фрикционными (для снижения коэффициента трения для уменьшения износа юбковой части поршня и гильзы двигателя) показателями.

Разберем данные показатели и характеристики отдельно.

Несмотря на то, что алюминиевые поршни имеют существенно меньший вес по сравнению, например, с деталями из сталей, их вес является достаточно большим. Для уменьшения веса двигателя требуется использовать материалы с более низкой плотностью, однако при этом возникает проблема получения заданной прочности. Обе эти проблемы возможно решить при использовании в качестве исходного материала сплавы

на основе титана (для данной работы предполагается использование сплава ВТ6).

Кроме вышеозвученных преимуществ перед алюминиевыми у титановых сплавов есть ещё одна особенность – высокая жаростойкость и жаропрочность. Эти два показателя как нельзя лучше подходят для условий работы таких деталей как «Поршень», условия работы которых характеризуются как очень тяжелые. Титан в основе такого изделия позволит повысить ресурс детали, а значит и всей поршневой группы, включающей в себя поршень, поршневой палец и шатун.

Кроме того титановые сплавы имеют гораздо меньший коэффициент теплового расширения и практически не склонны, в отличие от алюминия, к анизотропии, что позволит намного упростить обработку внешней поверхности поршня.

Однако использование титановых сплавов имеет и свои недостатки, а именно – наряду с получением увеличенных основных прочностных показателей мы получаем ухудшение условий трения боковой поверхности поршня о гильзу. Неучет этого факта может привести к повышенному износу самой гильзы, что в свою очередь может привести в лучшем случае – к повышенному расходу масла, а в худшем – к заклиниванию поршня и поломке всего двигателя с последующим дорогостоящим ремонтом.

Вариантов решения данной проблемы может быть несколько. Самый простой выход из сложившейся ситуации – получить на боковой поверхности титанового поршня покрытие, нивелирующее это отрицательно сказывающееся в данном случае свойство титана. Напыление, наплавка и диффузионное создание покрытий в свою очередь тоже имеют ряд недостатков, главными из которых являются быстрый износ (вплоть до разрушения поверхностного слоя) и довольно длительный по времени процесс их нанесения для довольно глубокого проникновения в материал основного сплава.

С другой стороны – почему бы не попробовать получить довольно толстый плакирующий слой на поверхности поршня? В данной работе такой слой планируется получить запрессовкой титановой основы в трубную заготовку из алюминиевого сплава. Использование алюминиевых сплавов с повышенным содержанием кремния позволит сохранить достаточную прочность поверхностных слоев на юбке и уменьшить износ поршней по боковой поверхности. Кроме того использование таких сплавов никоим образом не снизит теплообмен между деталями поршневой группы и маслом, что очень важно в свете проблемы возможного перегрева и прогара поршня.

Использование подобной конструкции позволит существенно снизить вес поршня при сохранении (а возможно и увеличении) прочностных показателей и характеристик стойкости и надежности изделия.

Так почему же такая конструкция не используется до сих пор, если у нее столько положительных качеств? Ответ на этот вопрос кроется в сложности получения неразрывного соединения двух материалов с сильно

различающимися свойствами, ведь при температуре, при которой возможно деформирование титана алюминий уже начинает плавиться.

При разработке данной темы было спроектировано несколько примерных технологических процессов, реализация которых возможна для данных сплавов при определенных условиях изготовления изделия типа поршень.

Изначально авторы работы опирались на разработку японских конструкторов, которая была опубликована ещё в 80-х годах прошлого столетия. На рис. 1 представлена упрощенная схема процесса совместного выдавливания биметаллического поршня из двух сплавов на основе алюминия, причем сплавы в той работе имели примерно одинаковые прочностные характеристики. Кроме того, общая алюминиевая основа позволяла деформировать материал в нагретом состоянии, когда оба компонента изделия находились в схожем пластическом состоянии. К сожалению, о практическом использовании подобной технологии никакой информации найти не удалось.

Не смотря на то, что предложенная схема получает поршень, как бы состоящий из двух частей, граница которых (сама по себе являясь концентратором напряжения в конечном изделии) располагается в довольно неблагоприятном месте (а именно – в месте расположения отверстия под поршневой палец) со всеми вытекающими последствиями, данная японская разработка была осмыслена в рамках данной работы.

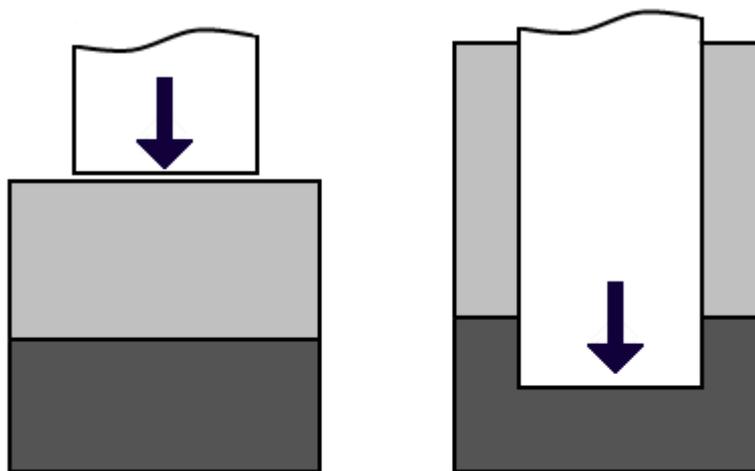


Рис. 1. Упрощенная схема «Японской технологии» производства биметаллического поршня

Однако попытки применить ее непосредственно к соединению титанового и алюминиевого сплавов натолкнулась на ряд проблем, решение которых либо существенно повысит трудоемкость процесса, сделав его недоступным даже для мелкосерийного производства, либо на настоящий момент технически не может быть реализовано.

Фактически же требуется получить границу материалов не поперек юбки, а вдоль.

Самое (на первый взгляд) простое решение – совместно выдавливать оба материала, чтобы получить заготовку, схематически изображённую на рис. 2.

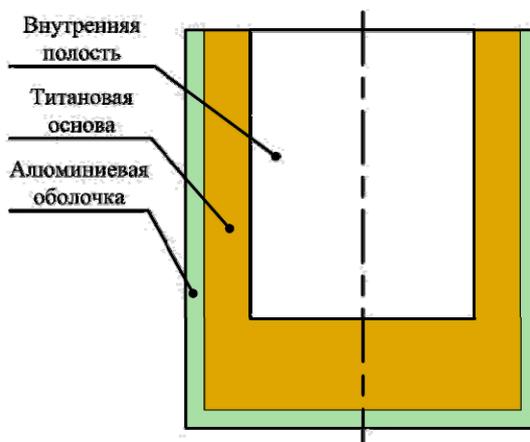


Рис. 2. Получение «равномерного» покрытия при помощи совместного выдавливания

Такая схема процесса не может быть использована по ряду причин:

– во-первых, возвращаемся к вопросу о температурном режиме деформации;

– во-вторых, существенно различающиеся характеристики материалов говорят о том, что деформироваться они будут тоже по-разному, что приведёт к практически полному выдавливанию сначала одного материала в свободную полость, а потом уже к деформации второго материала;

– в-третьих, если оболочка из алюминиевого сплава получится довольно тонкой на юбке (всей или какой-то ее части), то при механической обработке поверхности она либо будет удалена, либо получим выход основного материала на поверхность, что влечет за собой возможное расслоение по границе двух сплавов.

Проанализировав приведенную выше схему, было сделано одно немаловажное замечание – плакирующий слой нам необходим на юбке, а на приведенной схеме и днище получается закрыто алюминиевой оболочкой. Это отрицательно может сказаться при обработке камеры сгорания, кроме того следует учесть возможные дефекты на границе двух металлов.

Таким образом, наличие алюминиевого слоя на донной части поршня стоит считать недостатком предложенного варианта технологии. Логично было бы предложить вариант без донной части (рис. 2). Однако совместным выдавливанием такую деталь уже не получить. Плакирующий слой может быть получен либо обжимкой трубной заготовки на выдавленном титановом слое «поршня», либо запрессовкой титановой части изделия в трубную алюминиевую часть.

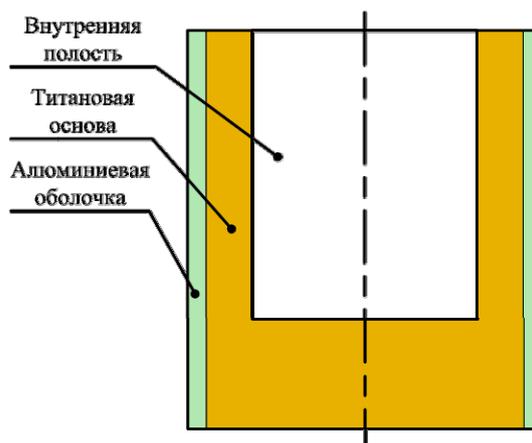


Рис. 2. Получение покрытия на боковой поверхности юбки при помощи трубной алюминиевой заготовки

Так как совершать обжим трубы более трудоёмкий процесс, чем запрессовка, то авторы данной работы остановились в настоящий момент на разработке оснастки для проведения экспериментов и теоретической обработке имеющегося материала с целью выработки математической модели, позволяющей оценить прочность получаемого соединения металлов. Опытный материал в ближайшем будущем должен подтвердить или опровергнуть данную теорию. В случае положительных результатов, авторами данной работы планируется исследовать различные условия для примерного технологического процесса с целью получить наиболее прочное соединение между материалами, которые в дальнейшем тоже могут варьироваться.

Примерный технологический процесс должен состоять из трёх основных этапов.

1) Раздельное получение титановой основы и алюминиевой оболочки (рис. 4) и обработка их соприкасающихся поверхностей для дальнейшего процесса изготовления изделия.

Раздельное получение заготовок позволяет использовать максимально удобные условия деформирования каждого материала, такие как оптимальная скорость нагрева заготовки, требуемая для данного материала температура обработки, скорость и усилие деформирования. Кроме того, раздельное получение составляющих частей позволит подготовить «свариваемые» поверхности, удалив с них излишнюю окисную пленку, очистив от окалины и придать требуемую шероховатость поверхностям. При этом «титановая» основа по наружной поверхности выполняется с небольшой конусностью (примерно $1-3^\circ$). Это желательно выполнить как для облегчения извлечения выдавленной заготовки из матрицы (контейнера). Кроме того небольшой угол уже на этапе запрессовки в «алюминиевое» кольцо позволит предварительно продеформировать материал оболочки, разрушая его окисную плёнку и параллельно создавая контакт с материалом основы.

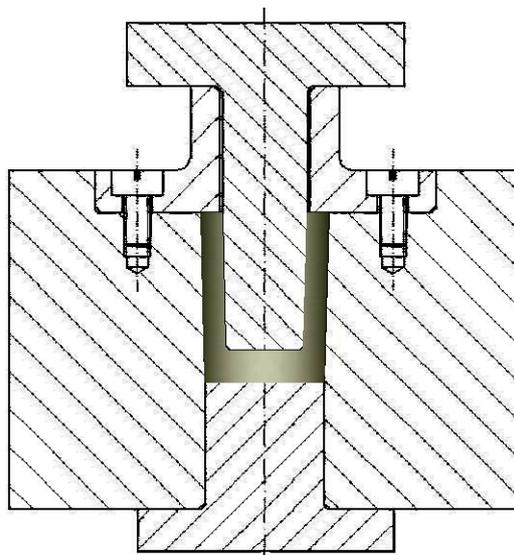


Рис. 4. Выдавливание заготовок под запрессовку основы в оболочку

2) Запрессовка титановой основы в трубную алюминиевую заготовку (рис. 5).

После очистки поверхностей кольцо—«оболочку» укладывают в полость контейнера, которая выполнена с таким же углом как и матрица-контейнер для выдавливания титановой «основы».

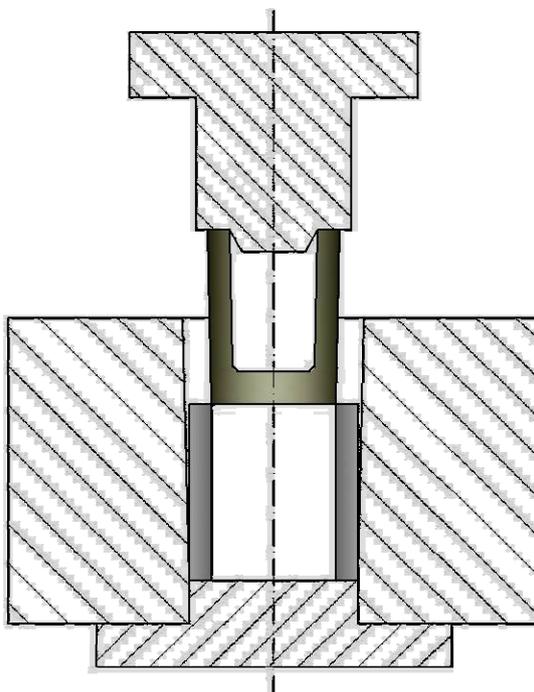


Рис. 5. Непосредственно запрессовка основы в оболочку

Технологически это можно объяснить тем, что для сохранения примерно одинаковой толщины плакирующего слоя по юбке поршня требуется внешний подпор для более пластичного алюминиевого слоя. После запрессовки получим поршень, равномерно расширяющийся кверху с углом наклона боковой стенки до $1,5-2^\circ$.

3) Протяжка полученного полуфабриката для придания деформации зоне контакта (для происхождения диффузионного сваривания этих материалов) и для получения заготовки нужного диаметра под механическую обработку (рис. 6) ориентировочно должна проводиться в горячем состоянии.

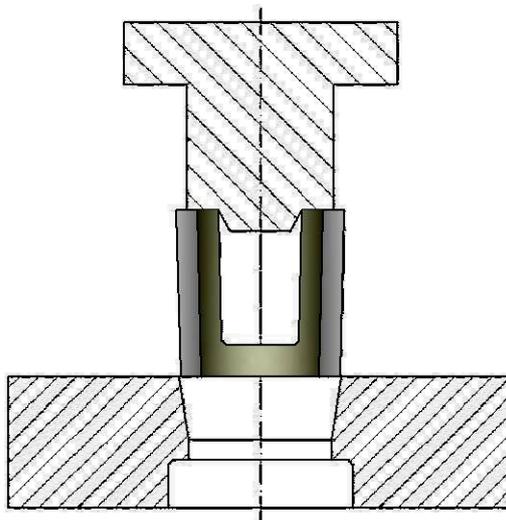


Рис. 6. Протяжка полуфабриката через матрицу с меньшим наружным диаметром для деформирования наружного слоя и границы сваривания

Под действием температуры и приложенных сил на границе материалов должны активно происходить процессы взаимной диффузии, что является неперенным условием получения неразрывного соединения. Требуемая для прочного соединения двух материалов степень деформации в зависимости от разницы диаметров матрицы и изделия будет устанавливаться по результатам проведенных опытов.

В настоящий момент исследование находится на стадии детальной проработки оснастки для проведения опытов. Если полученные практические результаты подтвердят правильность разработанной технологии, то возможно данная тема будет продолжена более детальными исследованиями, включающими в себя прочностные расчеты с помощью современных компьютерных программ в зависимости от варьирования основных параметров процесса. Кроме того, в случае положительных результатов, планируется по полученной разработке получить авторское свидетельство и внедрить полученный технологический процесс в реальное производство.

Литература

1. *Мастеров В.А., Берковский В.С.* Теория пластической деформации и обработка металлов давлением. – М., «Металлургия», 1970. – 296 с.
2. *Гильденгорн М.С., Керров В.Г., Кривонос Г.А.* Прессование со сваркой полых изделий из алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgy, 1974. – 234 с.
3. Интернет–ресурс ru.wikipedia.org
4. Интернет–ресурс «[Моторный центр АБ-Инжиниринг. Современные поршни](#)» (статья канд. техн. наук Хрулева А. «Современные поршни»).