

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кубанский государственный аграрный
университет имени И. Т. Трубилина»

М. И. Чеботарев, М. Р. Кадыров

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Учебное пособие

Краснодар
КубГАУ
2016

УДК 631.3.02:629.083(075.8)

ББК 40.7

Ч-34

Рецензенты:

Е. И. Винецкий – профессор, д-р техн. наук
(ГНУ ВНИИТТИ Россельхозакадемии);

А. Г. Черноиванов – директор
(Северо-Кавказский научный центр ГОСНИТИ);

В. Ю. Фролов – профессор, д-р техн. наук
(Кубанский государственный аграрный университет)

Чеботарев М. И.

Ч-34 Выбор оптимального способа восстановления изношенной поверхности детали : учеб. пособие / М. И. Чеботарёв, М. Р. Кадыров. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – 91 с.

ISBN 978-5-00097-184-0

В учебном пособии подробно проанализированы причины возникновения износа, способы восстановления изношенной поверхности детали, рассмотрены критерии выбора, приведены примеры расчета.

Предназначено для студентов направлений подготовки: 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Технические системы в агробизнесе» (бакалавриат); 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» (специалитет).

УДК 631.3.02:629.083(075.8)

ББК 40.7

© Чеботарёв М. И.,
Кадыров М. Р., 2016
© ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный аграрный
университет имени
И. Т. Трубилина», 2016

ISBN 978-5-00097-184-0

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации сельскохозяйственной техники по мере увеличения наработки машин под действием нагрузки и окружающей среды искажаются формы рабочих поверхностей и изменяются размеры деталей, увеличиваются зазоры в поверхностях и снижаются натяги в неподвижных соединениях; нарушается взаимное расположение деталей, что приводит к возникновению дополнительных нагрузок и вибраций, нарушению зацепления зубчатых передач. Снижаются упругие и эластичные свойства деталей и материалов, появляются усталостные и коррозионные разрушения и т. п.

В результате этого детали машин и их соединения теряют работоспособность, что требует либо их замены, либо восстановления. Однако в условиях ограниченности финансовых и материальных ресурсов хозяйств эта проблема может быть решена не только за счёт замены изношенных деталей новыми, что проще, но и, в основном, за счёт ремонта и их восстановления, что значительно экономичнее. На запасные части к автомобилям расходуется свыше 40 %, а к тракторам – около 50 % металла, идущего на изготовление этих машин.

Исследованиями установлено, что 85 % деталей машин становятся неработоспособными при износах поверхностей не более 0,2–0,3 мм, а себестоимость восстановления составляет 50–60 % от стоимости новой детали. К тому же в последние годы разработаны и применяются технологии, которые позволяют получить ресурс восстановленной детали на уровне новой и даже выше. Поэтому восстановление многих деталей является целесообразным и экономически выгодным.

Изношенные поверхности деталей могут быть восстановлены, как правило, несколькими способами. Для обеспечения наилучших технико-экономических показателей в каждом конкретном случае в зависимости от конструктивных особенностей детали, масштабов производства необходимо выбирать из числа возможных наиболее рациональный способ, который обеспечивал бы наилучшие их значения.

Решению этой инженерной задачи и посвящено настоящее учебное пособие.

1 ИЗНОСЫ И ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1 Причины снижения работоспособности машин в процессе эксплуатации

В процессе эксплуатации машины подвергаются различным внешним (эксплуатационным) и внутренним воздействиям, в результате чего изменяется их техническое состояние, что ухудшает технико-эксплуатационные показатели машин: увеличивается расход топлива и масла; уменьшаются рабочие скорости и мощность, тяговое усилие; снижается производительность. Основные причины снижения исходных характеристик: нарушение исходных регулировок механизмов и систем, ослабление креплений, изменение свойств материалов, зазоров и натягов в соединениях деталей в результате изнашивания.

К внешним факторам, влияющим на надежность машин, относятся климатические условия, свойства почвы и растений, уровень технического обслуживания (в том числе и при хранении), ремонта, квалификации обслуживающего персонала и др.

Климатические условия характеризуются температурой, влажностью, запыленностью воздуха и др. При эксплуатации машин в зимний период, особенно во время пуска двигателей, поступление загустевшей смазки к трущимся поверхностям затруднено, что приводит к ускоренному изнашиванию деталей. Повышенная температура воздуха в летний период вызывает перегрев двигателя, а следовательно, уменьшение вязкости смазочного материала и толщины масляной пленки на трущихся поверхностях, что ведет к появлению задиров. Высокая влажность воздуха, наличие в нем паров ядохимикатов и удобрений ускоряют коррозионные процессы. Значительная запыленность воздуха увеличивает опасность проникновения абразивных частиц в цилиндры двигателя, в топливо и смазочные материалы, что может увеличить скорость изнашивания деталей.

Существенное влияние на долговечность сельскохозяйственных машин оказывают *свойства почвы и растений*. Повышение

сопротивления при обработке растительной массы в 1,5–3 раза увеличивает нагрузки на агрегаты машин, возрастает число отказов.

К внешним (эксплуатационным) факторам, влияющим на техническое состояние машин, относится *уровень технического обслуживания и ремонта*. Несвоевременное или неправильное регулирование соединений, несвоевременная замена смазочного материала или изношенных деталей, ослабление крепления сборочных единиц машины вызывают повышенный износ деталей, сокращают ресурс составных частей машины в 2–3 раза. Закрытая заправка машин топливо-смазочными материалами в целях предотвращения попадания пыли, качественное техническое и технологическое регулирование, исключение перегрузок и нарушения теплового режима работы – все это создает благоприятные условия для уменьшения числа отказов.

При длительном хранении от коррозии, структурных превращений и остаточной деформации от собственной массы машины качество материала деталей изменяется. Под действием атмосферных осадков, резких перепадов температур, солнечного излучения материалы стареют. У полимерных и резинотекстильных материалов снижается эластичность, уменьшается сопротивление на удар, сжатие и изгиб, повышается твердость. При совместном воздействии озона и солнечных лучей резина разрушается наиболее интенсивно. Смазочные материалы, попавшие на детали из резинотекстиля, вызывают разбухание резины. Поэтому неподготовленные к хранению резиновые шины, прорезиненные ремни, гидрошланги и другие детали быстро выходят из строя. Из-за нарушения правил хранения срок службы пневматических шин может снижаться в среднем на 10–15 % в год. Вредное воздействие на неработающие машины оказывают длительные статические нагрузки. Именно поэтому в некоторых случаях наблюдают деформацию рам, платформ, пальцевых брусьев режущих аппаратов у машин, не установленных в горизонтальное положение на подставки. Статические нагрузки испытывают также различные пружинные механизмы. При длительном хранении пружины необходимо ослабить, чтобы они не потеряли своей упругости. Надежность машин и их составных частей в значительной мере зависит от силы вибрации, кото-

рая возникает в процессе работы. Причина повышенной вибрации – дисбаланс (неуравновешенность) быстровращающихся деталей и сборочных единиц (карданных и коленчатых валов, маховиков, шкивов, дисков сцепления колес и т. д.). Неуравновешенность деталей возникает вследствие неравномерной плотности материала, погрешностей обработки деталей, неточностей сборки сборочных единиц (перекосы, смещения и т. д.), появления износов и деформаций в процессе эксплуатации машин. Вибрация создает дополнительные нагрузки на детали, в том числе и на подшипники, в результате чего они изнашиваются интенсивнее.

К внутренним факторам, вызывающим изменение исходных характеристик машины, относят несовершенство конструкции машин (физико-механические свойства материалов, используемых для изготовления деталей), технологии их изготовления или ремонта. Исправной считают машину, полностью укомплектованную предусмотренными конструкцией, отрегулированными, нормально работающими и обеспечивающими безопасность движения агрегатами и механизмами и пригодную к использованию по назначению. Работоспособность машин, определенных показателей, характеризующих их надежность, достигают в процессе их конструирования и производства. Однако в результате воздействия на детали и агрегаты различных видов энергии (механической, тепловой, химической и др.) создаются условия для ухудшения технического состояния машин в процессе их эксплуатации.

Рассматривают пять состояний объекта (машин) в период его эксплуатации.

Исправное состояние (исправность) – состояние машины, при котором она соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Неисправное состояние (неисправность) – состояние машины, при котором она не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Работоспособное состояние (работоспособность) – состояние машины, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Неработоспособное состояние (неработоспособность) – состояние машины, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Предельное состояние – состояние машины, при котором ее дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление ее исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Переход машины из исправного в неисправное, но работоспособное состояние называют *повреждением* – явление, заключающееся в нарушении исправного состояния машины при сохранении работоспособного состояния. Восстанавливают работоспособность машины и обеспечивают ее нормальное функционирование в ходе технического обслуживания и ремонта. Эффективность этих мероприятий в значительной мере зависит от одного из свойств надежности – ремонтпригодности. Под *ремонтпригодностью* машины понимают приспособленность ее к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания (ТО) и ремонтов. Применительно к сельскохозяйственной технике ремонтпригодность может характеризоваться контролепригодностью, доступностью, легкоъемкостью, блочностью, взаимозаменяемостью и восстанавливаемостью.

1.2 Теории трения и изнашивания

Основная причина потери работоспособности машин в процессе эксплуатации – механическое истирание их составных элементов.

Для объяснения природы трения и изнашивания при механическом истирании существуют три теории, дополняющие и уточняющие друг друга. Их исходные положения сводятся в основном к механическому, молекулярному и молекулярно-механическому взаимодействиям между трущимися поверхностями. Отсюда и эти теории называют механической, молекулярной и молекулярно-механической.

Механическая теория. Изнашивание представляет собой процесс деформации и разрушения поверхностных слоев, происходя-

щий в результате механического взаимодействия микронеровностей при скольжении одного тела по-другому.

Сближение шероховатых поверхностей приводит как к контакту микронеровностей, так и к взаимному проникновению микровыступов одной из поверхностей во впадины другой. В связи с различной высотой микронеровностей контактирующие микровыступы нагружаются по-разному, поэтому одни из них испытывают упругие деформации, другие – пластические. При относительном перемещении трущихся поверхностей имеют место все известные виды деформаций – смятие, сдвиг, изгиб.

Трущиеся детали соприкасаются не всей видимой поверхностью, а лишь микровыступами, пятнами касания. Фактическая площадь касания составляет 0,01–0,001 видимой поверхности (в зависимости от класса шероховатости). В силу этого удельные нагрузки на отдельные микровыступы достигают больших значений. Так, если в подшипниках коленчатых валов автотракторных двигателей среднее расчетное давление составляет 4 МПа, то фактическое давление на микровыступах может достигать 400–4000 МПа. При таком давлении в контактных точках возникают температурные вспышки локального характера (около 1000 °С) и происходит сваривание микровыступов с почти мгновенным разрывом мостиков сварки (рисунок 1.1).

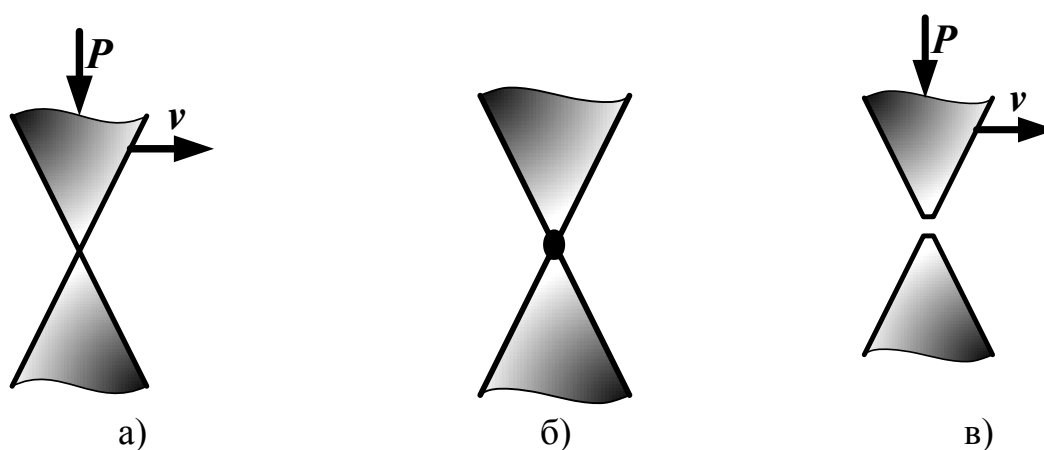


Рисунок 1.1 – Схемы образования и разрушения мостиков сварки: а – контакт микровыступов; б – мостик сварки; в – разрыв мостика сварки; P – нагрузка; v – скорость относительного перемещения

Показанный характер износов подтверждается на практике в виде задиров и наплывов на трущихся поверхностях. С течением времени фактическая площадь касания увеличивается. Идет процесс приработки.

В период приработки происходит «перемалывание» старых микронеровностей, полученных при механической обработке, с образованием новых. Значительная часть работы трения (70–80 %) переходит в теплоту, поэтому температура на поверхностях трения резко увеличивается.

При установившемся трении тепловой баланс стабилизируется и соединение приобретает некоторую среднюю температуру, соответствующую периоду нормального изнашивания.

Разделяя процесс изнашивания на два основных периода (первоначальной приработки и нормального изнашивания), механическая теория получила довольно стройный вид. Однако, находясь на позициях механической теории, невозможно объяснить некоторые явления, происходящие при изнашивании материалов. Так, если считать, что изнашивание – следствие лишь процессов деформации и разрушения поверхностных слоев при механическом взаимодействии микронеровностей, то трудно объяснить, почему чисто обработанные поверхности в процессе трения и изнашивания приобретают определенную шероховатость. Не представляется возможным объяснить и то, что поверхности с высокими механическими свойствами при трении о мягкие поверхности изнашиваются.

Для объяснения указанных фактов и явлений профессором Б. В. Дерягиным выдвинута молекулярная теория трения и изнашивания.

Молекулярная теория. Эта теория исходит из допущения существования молекулярных сил взаимодействия между контактирующими микровыступами. Факт существования молекулярной адгезии можно увидеть из эмпирической формулы Кулона, полученной им в 1799 г.,

$$F = A + \mu N, \quad (1.1)$$

где F – сила трения;

A – молекулярная составляющая силы трения;

μ – коэффициент трения;

N – нормальная нагрузка.

Из этой формулы следует, что даже при отсутствии нагрузки, когда $N = 0$ поверхности трения взаимодействуют, так как сила трения при этом $F > 0$ ($F = A$).

В соответствии с молекулярной теорией трения и изнашивания на отдельных участках трущихся поверхностей молекулы настолько сближаются, что начинает проявляться взаимодействие молекулярных сил, аналогичное притяжению разноименных зарядов. Результат молекулярного взаимодействия между трущимися телами – износ чисто обработанных поверхностей.

Более полно физическую сущность явлений трения и изнашивания отражает молекулярно-механическая теория, предложенная И. В. Крагельским.

Молекулярно-механическая теория. Эта теория исходит из предположения, что трение имеет двойственную природу и обусловлено как взаимным внедрением микровыступов трущихся поверхностей, так и силами молекулярного взаимодействия. Молекулярное взаимодействие поверхностей трения невозможно без их тесного сближения. При этом неизбежны внедрение и разрушение микровыступов.

Эта теория с учетом влияния на процесс изнашивания вида трения является общепризнанной.

Виды трения. По ГОСТ 23.002 различают два основных вида трения: трение без смазочного материала и трение со смазочным материалом. Особенно опасным считают трение *ювенильных* (обнаженных) поверхностей. Оно относится к трению без смазочного материала и характеризуется непосредственным взаимодействием между твердыми телами при отсутствии между ними третьей фазы (например, оксидной пленки), способной выполнять смазочную функцию.

Ювенильная поверхность несет значительный запас свободной поверхностной энергии и, следовательно, характеризуется высокой адсорбционной способностью. Коэффициент трения при взаимодействии ювенильных поверхностей достигает 6–7 единиц и сопровождается схватыванием поверхностей (заеданием).

Металлическая поверхность может сохранять ювенильные свойства лишь в условиях высокого вакуума или в атмосфере инертного газа, что встречается при износе деталей в случаях, когда отделяются оксидные пленки и твердые тела вступают в непосредственный контакт. Такое явление наиболее часто имеет место при трении деталей из однородных материалов, например сталь по стали.

Различают жидкостное и граничное трение со смазочным материалом.

Жидкостное трение имеет место при наличии промежуточного слоя смазки, полностью разделяющего трущиеся поверхности. Процессы трения и изнашивания характеризуются при этом не материалом трущихся деталей, а вязкостью смазочного слоя, конструкцией и режимом работы соединения.

При уменьшении толщины масляного слоя трущиеся поверхности сближаются. Когда в процессе сближения достигается такое положение, при котором они разделяются не слоем смазки, а масляной пленкой молекулярной толщины, наступает граничное трение.

Граничное трение возникает под действием молекулярных сил трущихся поверхностей, смазочное вещество прочно адсорбируется на поверхностях трения. Полярные концы молекул смазочного вещества образуют на поверхностях трения «молекулярный частокол».

Граничная фаза масляной пленки, находясь под двусторонним воздействием молекулярных сил, приобретает квазитвердое состояние с расклинивающим давлением, оказывающим сильное сопротивление образованию металлического контакта.

Указанные свойства предохраняют трущиеся поверхности разрушения.

1.3 Виды и основные закономерности изнашивания

Изнашивание – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела при трении и (или) увеличении его остаточной деформации, проявляющейся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ – результат изнашивания, определяемый в единицах длины, объема, массы. Износ деталей и соединений приводит к ухудшению функциональных показателей машины и, как правило, регламентирует их ресурс. В результате износа нарушается кинематическая точность механизмов, снижается производительность, уменьшается прочность деталей, увеличиваются расходы на ремонт машин, затраты энергии на производство конечной продукции, появляются не предусмотренные расчетом дополнительные нагрузки, вибрация, шум.

Под *износостойкостью* понимают свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания.

Ввиду сложности процессов, протекающих в поверхностных слоях твердых тел при изнашивании, различия условий и режимов работы соединений и причин изнашивания предложить строгие единые классификационные признаки всего многообразия процессов изнашивания невозможно.

Наиболее распространена следующая классификация видов изнашивания по воздействию на поверхность трения и протекающих на ней процессов при эксплуатации машин:

механическое изнашивание – абразивное, гидроабразивное (газоабразивное), гидроэрозионное (газоэрозионное), кавитационное, усталостное, изнашивание при фреттинге, изнашивание при заедании;

коррозионно-механическое – окислительное, изнашивание при фреттинг-коррозии; электроэрозионное.

Механическое изнашивание – изнашивание в результате механических воздействий. Коррозионно-механическое изнашивание – изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрохимическим взаимодействием материала со средой.

Электроэрозионное изнашивание происходит при прохождении через контакт трущихся поверхностей электрического тока.

Характерные причины образования различных видов изнашивания и примеры изнашивания приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Вид изнашивания и причина его образования

Вид изнашивания	Причина	Пример
Механическое изнашивание		
Абразивное	Изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия на него твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии	Рабочие органы и ходовая часть сельскохозяйственной, строительной-дорожной техники, различного рода смесительные машины и оборудование перерабатывающих производств
Гидроабразивное	Абразивное изнашивание в результате действия твердых частиц, взвешенных в жидкости (газе) и перемещающихся относительно изнашиваемого тела	Элементы топливной аппаратуры двигателя, объемного гидропривода, детали компрессоров и пневматического инструмента, выхлопные коллекторы, трубы
Гидроэрозионное (газоэрозионное)	Изнашивание поверхности тела под воздействием потока жидкой или газовой среды	Золотники гидравлических и топливных агрегатов, детали глубинных насосов, перекачивающих глинистые растворы или нефть
Кавитационное	Изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки воздуха захлопываются вблизи поверхности, что создает местное высокое ударное давление	Крыльчатка и корпус водяного насоса, наружные поверхности гильз цилиндров, подшипники скольжения, лопасти турбин, гребных винтов
Усталостное	Изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемных участков материала поверхности трения	Питтинг, возникающий при трении качения в шариковых и роликовых подшипниках, опорно-поворотных устройствах, катках.

Продолжение таблицы 1.1

Вид изнашивания	Причина	Пример
Изнашивание при фреттинге	Изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении	Шлицевые соединения
Изнашивание при заедании	Изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникающих неровностей на сопряженную поверхность	Втулка опорного колеса плуга, зубчатые передачи, гипоидные и винтовые передачи, тяжело нагруженные опоры качения
Коррозионно-механическое изнашивание		
Окислительное изнашивание	Изнашивание, при котором преобладает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей средой	Чугунные гильзы и поршневые кольца, образующие между собой гальваническую пару
Изнашивание при фреттинг-коррозии (фреттинг-коррозия)	Изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях	Посадки с запрессовкой колец подшипников качения, поршневые пальцы, колесные бандажи, болтовые, клиновые и штифтовые соединения
Электроэрозионное изнашивание		
Электроэрозионное	Изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока	Скользящие контакты электрических машин и сварочных аппаратов, токосъемы подъемно-транспортных машин

1 *Адгезионный износ* возникает в условиях трения, когда два гладких тела скользят друг по другу и частицы материала, вырванные с одной поверхности, прилипают к другой (рисунок 1.1). Этот вид износа имеет место, когда атомы контактирующих поверхностей входят в близкий контакт. На площадях контакта при скольжении поверхностей всегда существует вероятность того, что из-за

адгезионных сил разрушение этого контакта происходит не по первоначальной поверхности раздела одного материала, а внутри него.

2 *Абразивный износ* возникает в условиях трения, когда более твердые шероховатые поверхности скользят по более мягким, царапают или «пропахивают» их, образуя свободные частицы. Абразивный износ может возникнуть и тогда, когда твердые частицы попадают между поверхностями фрикционной связи и изнашивают их.

Абразивное изнашивание – наиболее распространенный вид изнашивания деталей сельскохозяйственной техники, вызываемый воздействием на них абразивных (твердых) частиц. Последние содержатся в почве, грунте и при контакте с поверхностью рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и землеройных машин приводят к абразивному износу.

Твердые (абразивные) частицы могут образовываться и в самой машине в виде закаленных частиц металла – продуктов износа соединенных пар трения.

Интенсивность абразивного изнашивания особенно велика у машин, эксплуатируемых в условиях запыленного воздуха, при недостаточной герметичности уплотнений.

Абразивное изнашивание длительное время связывали лишь с режущим действием абразивных частиц. С этим представлением связан и сам термин «абразивный», происходящий от латинского слова «abrasio» – соскабливание.

При таком подходе процесс изнашивания соединения вал-подшипник можно представить в виде схемы, показанной на рисунке 1.2.

Абразивные частицы 1 и 2 по-разному ведут себя в зависимости от твердости поверхностей соединенных деталей. Когда одна из трущихся поверхностей (А) изготовлена из мягкого материала, абразивные частицы 1 поглощаются этой поверхностью, что при малой концентрации абразивных частиц в смазочном материале предохраняет твердую поверхность (В) от износа. С течением времени мягкая поверхность насыщается абразивными частицами и превращается в своеобразный абразивный инструмент, который царапает соединенный с ней вал.

Если обе соединенные поверхности (B) имеют значительную твердость, то абразивные частицы 2, попадая в зазор между ними, или царапают их, или разрушаются, не повреждая ни ту ни другую. Все зависит от соотношения твердостей соединенных поверхностей и абразива.

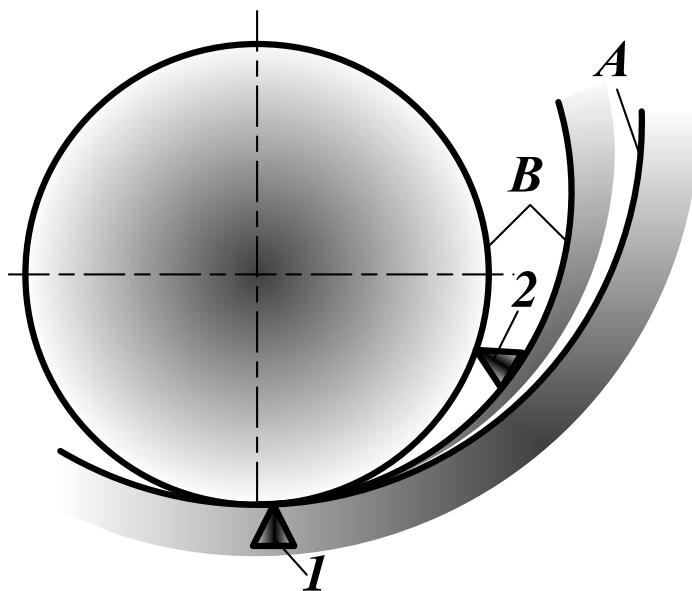


Рисунок 1.2 – Схема абразивного изнашивания соединения вал-подшипник:
 A – мягкая поверхность; B – твердые поверхности;
 1 и 2 – абразивные частицы

Степень агрессивности абразивных частиц по отношению к изнашиваемым поверхностям оценивают коэффициентом твердости

$$K_m = \frac{H}{H_a}, \quad (1.2)$$

где H – микротвердость материала детали;
 H_a – микротвердость абразива.

Профессором М. М. Тененбаумом установлено критическое значение коэффициента твердости $K_{m\text{кр}} = 0,5-0,7$.

При $K_m < 0,5$ – происходит интенсивное абразивное изнашивание, при $K_m > 0,7$ сопротивление материала абразивному изнашиванию резко возрастает.

Дальнейшие исследования абразивного трения показали, что твердость не может однозначно характеризовать сопротивление материала абразивному изнашиванию. Здесь оказывают влияние прочностные и некоторые другие свойства материала. Особенно интересными оказались свойства деформационных материалов.

Деформационными свойствами полимеров объясняется неожиданное поведение сравнительно мягких, пластичных материалов в условиях абразивного изнашивания. В отличие от ранее высказанного утверждения о решающем значении поверхностной твердости в снижении интенсивности абразивного изнашивания мягкие полимеры вполне удовлетворительно сопротивляются воздействию абразивных частиц.

Деформационные свойства проявляются в том, что напряжения на контактах абразивных частиц с пластмассами оказываются значительно меньшими по сравнению с напряжениями на контактах тех же частиц с металлами. Это приводит к тому, что для разрушения пластмассовой поверхности требуются значительно большие усилия, чем для разрушения металла.

3 *Коррозионный износ* имеет место, когда контакт поверхностей происходит в коррозионных средах. В процессе скольжения образующиеся на поверхности пленки разрушаются и коррозионное воздействие распространяется вглубь материалов.

Основная причина, вызывающая коррозионное разрушение металлов, – протекание на их поверхностях реакций взаимодействия металла с окружающей средой. Если последняя способна проводить электрический ток, то коррозию называют электрохимической.

Электрохимическая коррозия сопровождается упорядоченным движением ионов, то есть появлением электрического тока.

Силу коррозионного тока определяют по закону Ома:

$$I_{кор} = \frac{(E_k - E_a)}{R}, \quad (1.3)$$

где E_k и E_a – электродные потенциалы катода и анода;
 R – омическое сопротивление системы.

Электродные потенциалы E_i обычно находят по отношению к водородному электроду сравнения, потенциал которого принимают равным нулю. Например, $E_{Al} = -1,67$ В; $E_{Fe} = -0,44$ В; $E_{Cu} = -1,67$ В.

В соответствии с законом Ома появление тока коррозии имеет место при наличии разности потенциала ($E_k - E_a > 0$) и электропроводящей среды ($R < \infty$). Другими словами, электрохимическая коррозия имеет место при наличии в системе неоднородных металлов (катода и анода) и окружающей среды в виде электролита. При этом образуется гальваническая пара, в которой один из металлов (анод) претерпевает разрушение.

Иногда на практике наблюдается коррозия и однородных металлов. Коррозия последних происходит потому, что абсолютно однородные металлы в технике не применяют, так как они содержат включения графита, карбидов и др. Последние в сочетании с основным металлом образуют систему микрогальванических элементов, которые при наличии токопроводящей среды (электролита) приводят к электрохимической коррозии. Электролит образуется в результате конденсации влаги на поверхности металла и атмосферных газов (CO_2 , SO_2 и др.) в пленке воды.

4 *Поверхностная усталость* наблюдается во время многократного скольжения или качения по одним и тем же поверхностям с непрерывно повторяющимися циклами нагружения и разгрузки.

Установлено два наиболее решающих фактора, влияющих на процесс схватывания трущихся тел: их температура и нагрузка.

Начало процесса заедания может быть вызвано изменением различных факторов, например, увеличением скорости скольжения, нагрузки, температуры контактируемых поверхностей, уменьшением вязкости смазывающего материала и других факторов. В процессе заедания резко возрастает интенсивность изнашивания поверхностей, что приводит к росту динамических нагрузок и выходу из строя деталей машины. В обоих случаях заедания прекращается относительное перемещение и происходит заклинивание узла механизма. Однако в настоящее время отсутствует единое мнение о природе процесса заедания, что связано со сложностью явления и трудностями прямого экспериментального наблюдения за началом его возникновения и развития.

Некоторыми учеными предложена гипотеза, утверждающая, что при работе деталей и механизмов осуществляются два процесса: схватывание металлического сплава и окисление пластически деформированных поверхностных слоев с образованием растворов и химических соединений кислорода с материалами деталей по поверхности их взаимного контакта.

Распространена и теория износа пластичных металлических сплавов посредством отслаивания тонких «листочков» от поверхности детали в результате возникновения на определенной и примерно постоянной глубине остаточных напряжений, вызванных скоплением дислокаций, под воздействием другой детали, работающей в режиме скольжения.

Общепринятая классификация видов изнашивания не является строгой и не включает многие виды разрушения поверхности при трении, например водородное изнашивание, изнашивание при избирательном процессе и др.

Открытие эффекта водородного изнашивания принадлежит Д. Н. Гаркунову и А. Л. Полякову. Появление водорода в поверхностных слоях обусловлено интенсивным его выделением из смазочных материалов, топлива, окружающей газовой среды и неметаллических пар трения в результате трибохимических реакций. Присутствие водорода в поверхностных слоях может быть также результатом процессов литья и химико-термической обработки металлов. Адсорбция водорода, его диффузия в поверхностные слои и концентрация на некоторой глубине от поверхности в области максимальных температур обеспечивается спецификой температурного режима трения.

Поверхностный слой, насыщенный водородом, разрушается в результате образования большого числа трещин по всей зоне деформирования. Водородное изнашивание наблюдают в насосах, перекачивающих продукты нефтеперегонки, при трении полимерсодержащих тормозных колодок и в других узлах.

Уменьшение водородного изнашивания возможно легированием стали хромом, ванадием, титаном; применением смазочных материалов и введением в них ингибиторов; наполнением пластмассовой матрицы металлической стружкой; наведением электростатического поля.

Скорость изнашивания может быть существенно понижена при формировании в процессе трения на поверхности детали пленок меди. Образование таких пленок связывают с избирательным растворением и осаждением отдельных элементов сплавов, содержащих медь. Это явление имеет электрохимическую природу и получило название «избирательного переноса» (открыто Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским).

Избирательный перенос – наиболее яркое проявление эффекта двухслойной смазки, при котором и слой мягкого металла, покрывающего поверхности трения, и слой поверхностно-активных веществ (ПАВ), адсорбированных на нем, образуются непосредственно в процессе трения. Это дало основание называть явление избирательного переноса *эффектом безызносности*.

Избирательный перенос реализуется при трении стали по определенным медным сплавам (например, по некоторым бронзам или латуням) в ряде сред (прежде всего в глицерине, спиртоглицериновых средах, морской воде и т.д.) в определенных интервалах изменения условий работы соединения.

Под действием глицерина (или другой среды) при трении начинается избирательное анодное растворение легирующих бронзу элементов. Атомы этих элементов уносятся в смазочную среду, а поверхность бронзы обогащается медью. В восстановительной среде, которой является глицерин, эта медь не окисляется и поэтому очень активна. Она легко схватывается со стальной поверхностью, покрывая ее тонким слоем.

В этом слое возникает большое количество вакансий, часть которых образует поры, заполняемые молекулами глицерина. В результате образуется так называемая *сервовитная пленка* толщиной 1...2 мкм, которая имеет низкую прочность на сдвиг и не наклепывается при трении. Она прекрасно адсорбирует активные компоненты среды, прежде всего комплексные соединения, образуемые растворенными элементами сплава и продуктами механохимических превращений смазочной среды. Кроме того, обладая высокой теплопроводностью, она способствует снижению температуры поверхности трения путем отвода теплоты в глубинные слои материала.

Избирательный перенос, к сожалению, реализуется лишь при определенных сочетаниях материалов трущихся тел и смазочных материалов в определенном, достаточно узком интервале изменения действующих факторов (нагрузочных, скоростных и особенно температурных).

В общем случае процесс изнашивания деталей машин при постоянных условиях проходит три стадии (рисунок 1.3).

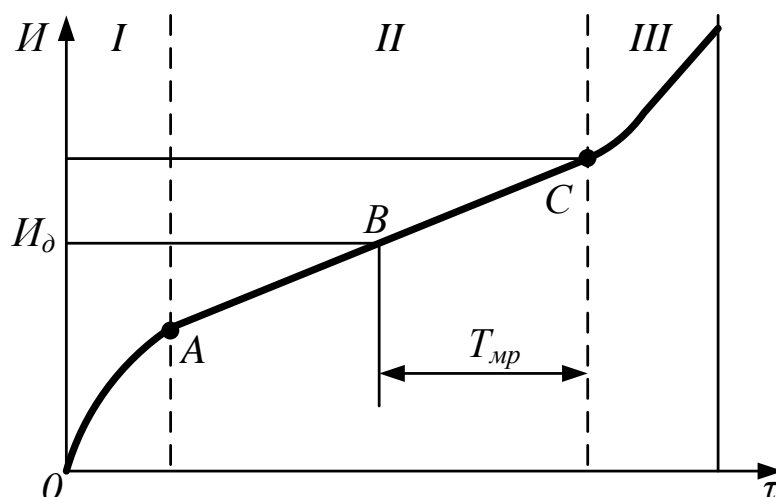


Рисунок 1.3 – Зависимость износа I трущихся тел от продолжительности изнашивания, τ :

I , II и III – стадии приработки, установившегося и катастрофического изнашиваний; I_0 – допустимый износ; I_{np} – предельный износ; T_{mp} – межремонтный ресурс

На стадии I (до точки A) осуществляется процесс приработки, то есть процесс изменения геометрии поверхности трения и физико-химических свойств материала. В процессе приработки, характеризуемом достаточно высокой скоростью изнашивания и существенным накопленным износом, устанавливается определенная для данной трибосистемы шероховатость, не зависящая от первоначальной шероховатости, полученной в результате технологической обработки, а зависящая от трущихся тел и смазочного материала, а также от условий изнашивания (нагрузки, скорости, температуры, условий смазывания и других).

После завершения образования равновесной шероховатости и оптимальных для данного соединения структур поверхностных

слоев трущихся тел начинается процесс установившегося изнашивания (рисунок 1.3, стадия II). При этом интенсивность изнашивания постоянна и достаточно невелика. Тем не менее, постепенное накопление износа через определенный период приводит к столь значительному изменению размеров и формы деталей, что условия работы узла трения значительно ухудшаются. Так, увеличение зазоров в сопряжениях вследствие износа составляющих их элементов приводит к повышению динамических нагрузок. Наступает период перехода к третьей стадии изнашивания – катастрофическому изнашиванию (рисунок 1.3, стадия III за точкой С). Скорость изнашивания резко возрастает, существенно увеличивается накопленный износ, и нежелательные явления в системе усиливаются. На этой стадии резко увеличивается частота отказов трущихся сопряжений, то есть увеличивается вероятность выхода из строя соединения.

Поскольку выход из строя соединения обусловлен изнашиванием рабочих элементов, для различных деталей можно установить характерный для них предельный износ – износ, соответствующий предельному состоянию изнашиваемого изделия или его составной части.

При достижении предельного состояния необходимо установить: возможно ли дальнейшее использование машины или ее составной части, или направить на капитальный ремонт, или списать.

Обоснованное принятие решения о дальнейшем применении машины или ее составной части по назначению, направлению на капитальный ремонт или списанию связано с умением оценить предельное состояние машины или ее составных частей.

Признаки, или критерии, по которым устанавливают предельное состояние машины или ее составных частей, подразделяют на экономические, качественные и технические.

Экономическими критериями оценивают снижение производительности машины, повышение расхода топлива, смазочных материалов, себестоимости выполнения работ. Их удобно применять при оценке экономической целесообразности дальнейшего использования машины по назначению.

Качественными критериями оценивают качество работы машины или агрегата. Предельные значения в этом случае устанавли-

вают в зависимости от выполнения машиной агротехнических требований и соответствие требованиям безопасности и экологичности.

Техническими критериями оценивают износы деталей машин, зазоры в подвижных и натяги в неподвижных соединениях. Технические критерии устанавливают с учетом прочности значений действующих нагрузок, условий трения и смазки, тепловой напряженности, интенсивности изнашивания, свойств поверхностных слоев.

Предельное состояние машины определяют по предельному состоянию ее основных и дополнительных составных частей. Например, колесный трактор с шарнирной рамой и гидромеханической коробкой передач считают в предельном состоянии, если в предельном состоянии находятся его основные составные части: двигатель, коробка перемены передач, передний и задний мосты с колесными редукторами и дополнительные составные части: управление поворотом с гидросистемой, рама, кабина в сборе, раздаточная коробка.

Двигатель находится в предельном состоянии, если в предельном состоянии находятся блок цилиндров (требуется его замена или восстановление с полной разборкой двигателя) и коленчатый вал, имеющий предельный износ коренных и шатунных шеек или механические повреждения, требующие его замены или шлифовки, расход масла на угар или прорыв газов в картер равны или превышают предельные значения и не устраняются после замены комплекта поршневых колец.

За предельное состояние сварной рамы или полурамы трактора принимают такое состояние, при котором длина трещины лонжеронов или поперечных брусьев и их сварных соединений, в том числе с несущими кронштейнами, превышает 40 % периметра сечения.

В процессе ремонта машин износы деталей или зазоры в соединениях замеряют при дефектации. По значению износов или величине зазоров судят о целесообразности дальнейшего использования детали или соединения.

Допустимыми износом I_0 детали или зазором в соединении называют такие износы, при которых деталь или соединение могут быть поставлены на машину без восстановления и будут удовле-

творительно работать в течение предусмотренного межремонтного ресурса $T_{мр}$ (рисунок 1.3, интервал от точки B до точки C).

Детали или соединения с износами или зазорами меньшими или равными допустимым устанавливаются на машину при ремонте без каких-либо восстановительных процессов, а с износами или зазорами, превышающими допустимые, – выбраковывают или восстанавливают.

Критерии предельного состояния машин и их составных частей, предельные и допустимые износы, зазоры и размеры деталей указывают в нормативно-технической документации.

Достаточно полная классификация износов при трении в зависимости от типа относительного движения контактируемых тел приведена в таблице 1.2. По виду движения различают износ, вызываемый скольжением, качением и вращением. Нагрузка при движении может быть статической, переменной или ударной, а также равномерной или неравномерной.

Таблица 1.2 – Классификация износов при трении в зависимости от типа относительного движения контактирующих тел

Вид износа	Тип движения	Нагрузка
Промежуточное вещество – жидкость		
При скольжении со смазкой	Скольжение	Постоянная или переменная
При качении со смазкой	Качение	
При вращении со смазкой	Вращение	
Промежуточное вещество – газ		
При скольжении со смазкой	Скольжение	Постоянная или переменная
При качении со смазкой	Качение	
При вращении со смазкой	Вращение	
Промежуточное вещество – твердое		
Абразивный при скольжении	Скольжение	Постоянная или переменная
Абразивный при качении	Качение	
Абразивный при вращении	Вращение	

Продолжение таблицы 1.2

Вид износа	Тип движения	Нагрузка
Вызываемый скользящей струей	–	Параллельно к поверхности износа
Вызываемый падающей под углом струей	–	Под углом к поверхности износа
Вызываемый падающей перпендикулярно струей	Закрытое истечение	Перпендикулярно к поверхности износа
Кавитационный	Удары при захлопывании пузырьков с пониженным давлением	
Обусловленный ударами капель жидкости	Удары свободно движущихся капель жидкости	
Ударный	Повторяющееся соударение двух твердых тел	

С практической точки зрения важнейшее значение имеют два вида износа:

- 1 Вызываемый трением скольжения (рисунок 1.4).
- 2 Вызываемый трением качения (рисунок 1.5).

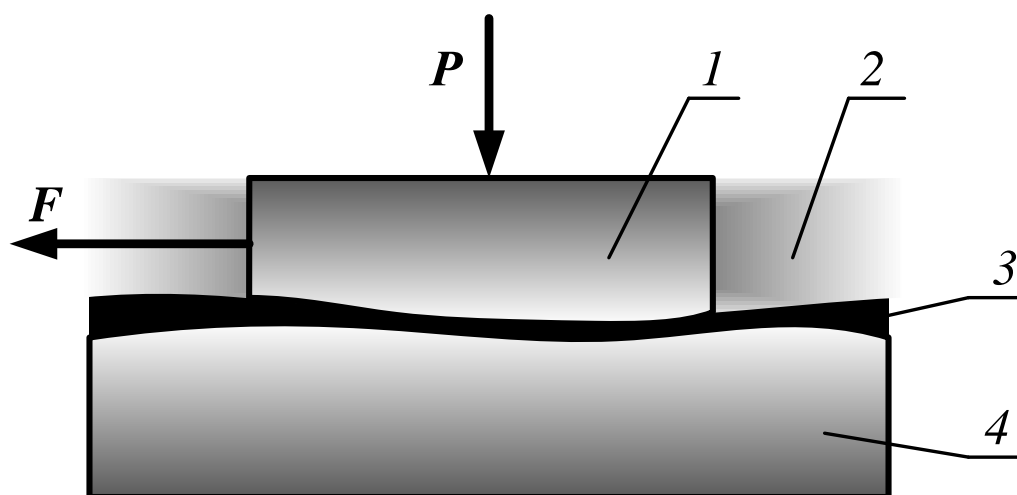


Рисунок 1.4 – Схема износа контактирующих тел при трении скольжением:
 F – направление движения; P – усилие; 1 – первое контактирующее тело;
 2 – окружающая среда; 3 – промежуточное вещество;
 4 – второе контактирующее тело

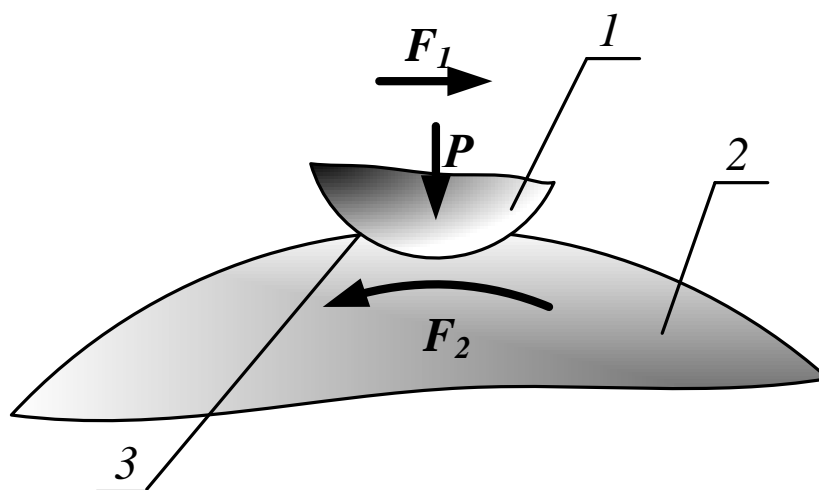


Рисунок 1.5 – Схема износа при трении качения контактирующих тел:
 F_1 – направление движения ролика 1; F_2 – направление движения вала 2;
 3 – упругая деформация при переменном нагружении; P – усилие давления

В процессе износа при трении скольжения материалы под действием напряжений работают на срез, а в процессе износа при трении качения развиваются нормальные напряжения. При длительном нагружении под действием переменных давлений это приводит к выкрашиванию частиц на поверхности, то есть к образованию раковин («питтинга»).

Если наряду с нормальными напряжениями развиваются также и касательные, то происходит проскальзывание, в наибольшей степени способствующее процессу износа. Нагружение, сочетающее скольжение и качение, возможно, например, в зубчатых передачах.

Износ при трении скольжения, вызываемый вращением, образуется в вершинах опор и в шаровых подпятниках. Это тот вид износа, при котором имеет место эффект вращения при относительном смещении соприкасающихся участков поверхности. Все три типа износа могут проявиться в смешанных формах.

Типичным примером ударного износа является износ колец седла клапана двигателя внутреннего сгорания. Ударный износ, как и износ, обусловленный трением качения, приводит к образованию питтинга.

При обычном трении, как без смазочного материала, так и при наличии граничной смазочной пленки детали контактируют на очень малой площади, составляющей 0,01–0,0001 номинальной площади сопряженных поверхностей. В результате участки факти-

ческого контакта испытывают высокие напряжения, что приводит к их взаимному внедрению, пластической деформации и интенсификации изнашивания. Схемы контакта при трении качения приведены на рисунке 1.6, а на рисунке 1.7 – схемы контакта стальной и бронзовой трущихся деталей при граничной смазке и при избирательном переносе. Если при граничной смазке контакт сопряженных поверхностей происходит только в отдельных точках, то при избирательном переносе он осуществляется через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди. В результате площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей испытывает лишь упругие деформации. При граничной смазке взаимодействие неровностей поверхностей вызывает усталостное изнашивание. При избирательном переносе трение непрерывное, площадки действительного контакта плоские.

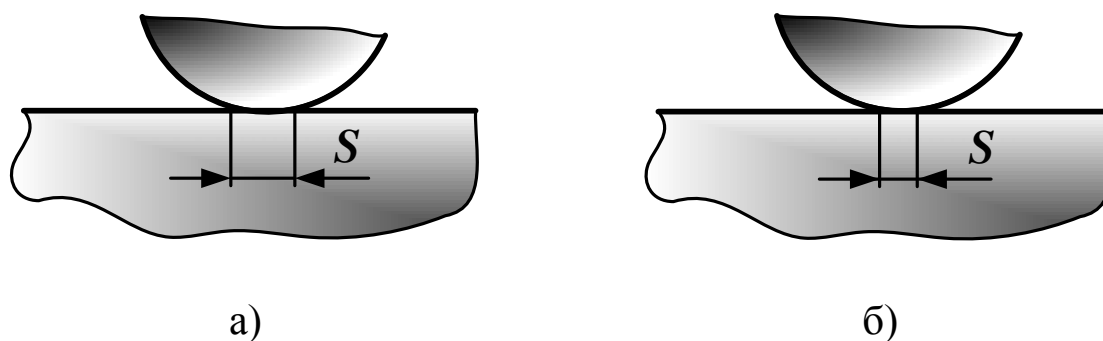


Рисунок 1.6 – Схемы контакта при трении качения ролика с кольцом при наличии граничной смазки (а) и без нее (б)

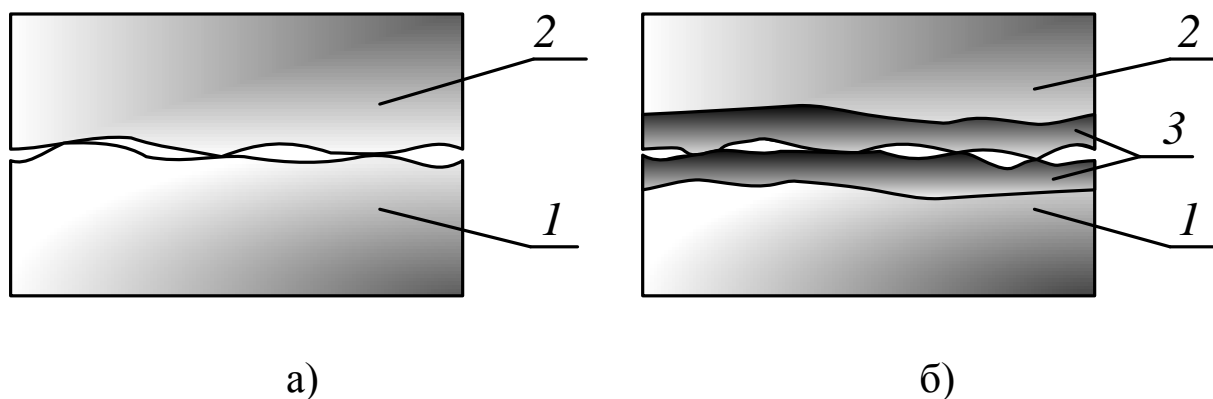


Рисунок 1.7 – Схемы контакта деталей при граничной смазке (а) и избирательном переносе (б):
1 – сталь; 2 – бронза; 3 – пленка меди

При трении с граничной смазкой и трении без смазочного материала поверхности деталей всегда покрыты окисными пленками (рисунок 1.8), которые предотвращают непосредственный контакт металлических поверхностей и их схватывание. Однако окисные пленки хрупки, неспособны многократно деформироваться и поэтому в процессе трения разрушаются в первую очередь. С повышением температуры в зоне трения окисные пленки утолщаются, при этом увеличивается и объем их разрушения.

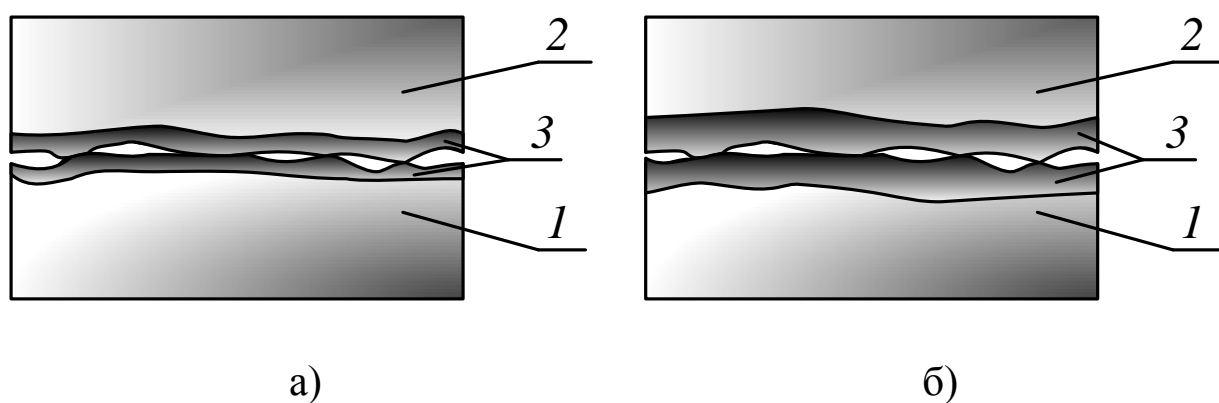


Рисунок 1.8 – Схемы контакта деталей при наличии окисла при граничной смазке (а) и избирательном переносе (б):
1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисные пленки; 4 – сервовитные пленки

Виды разрушения деталей при трении могут быть допустимыми и недопустимыми (рисунок 1.9).

Частыми причинами выхода из строя, например, опор качения являются усталостное выкрашивание дорожек и тел качения, заклинивание и разрыв сепараторов, абразивное изнашивание. При эксплуатации опор качения указанные повреждения в ряде случаев могут быть устранены или уменьшены при использовании металлоплакирующих смазочных материалов (рисунок 1.10).

Долговечность пар трения с линейным контактом, например, тел качения и колец обратно пропорциональна нагрузке на более нагруженное тело. Снижение этой нагрузки на 10 % повышает долговечность подшипника на 36 %. Создание между телом качения и кольцом подшипника металлической пленки увеличивает площадь контакта и тем самым снижает максимальную нагрузку на тело качения.

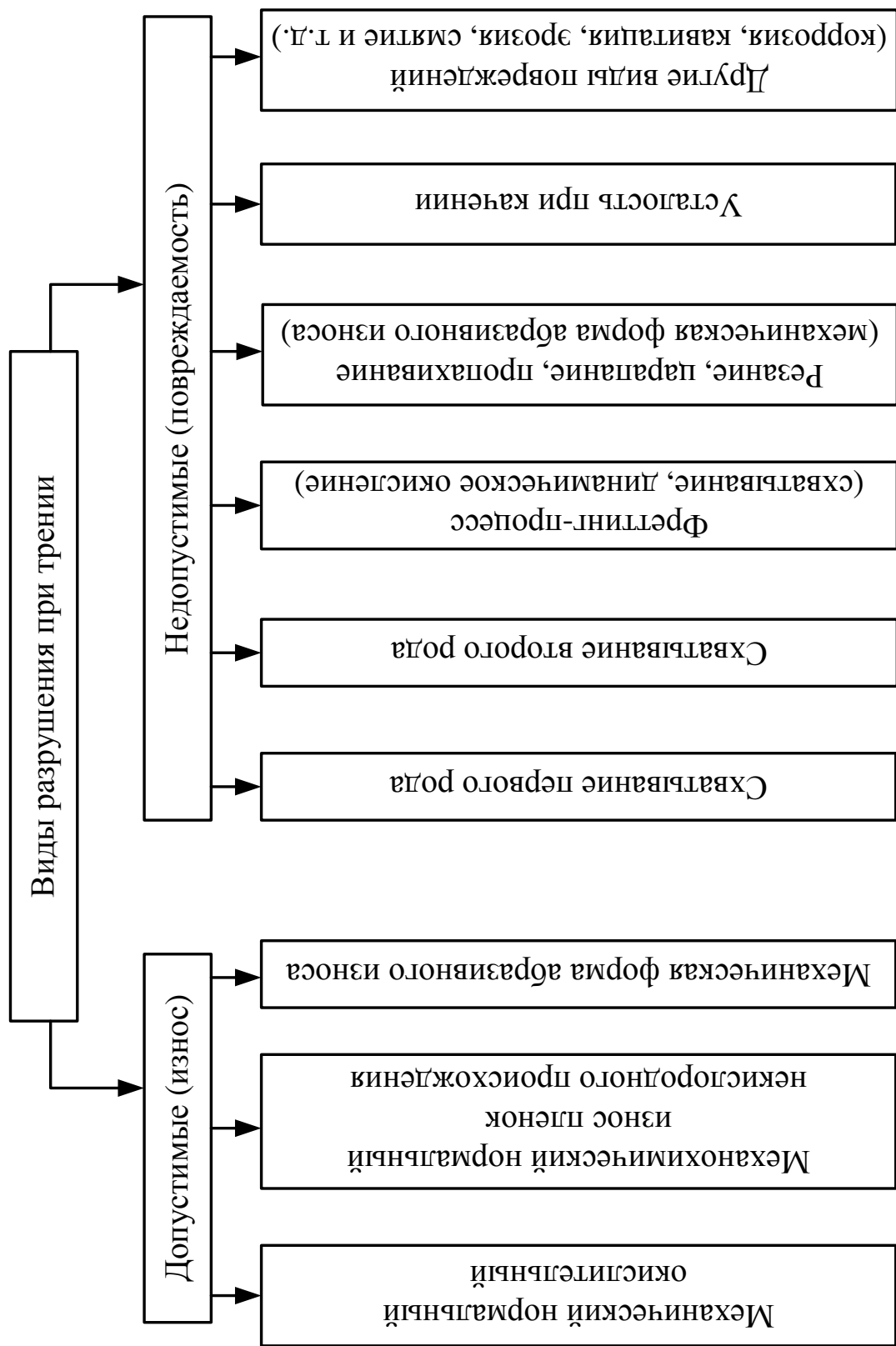


Рисунок 1.9 – Классификация видов разрушения при трении

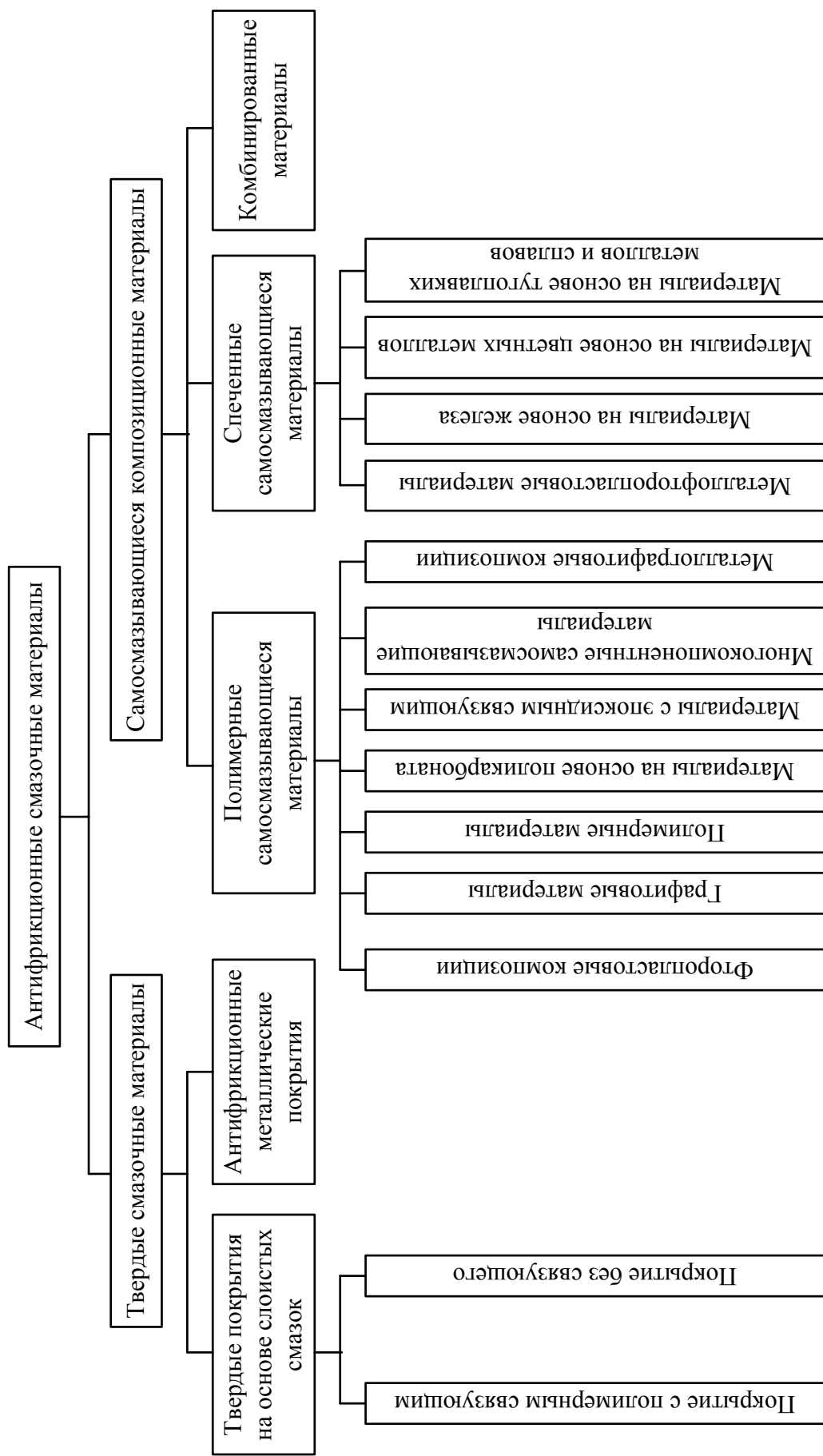


Рисунок 1.10 – Антифрикционные смазочные материалы и покрытия для узлов сухого трения

Сервовитная пленка толщиной 0,5–1,0 мкм может увеличить даже при достаточно большой нагрузке площадь контакта в 1,5–2 раза.

Практически, все встречающиеся виды износа могут быть представлены как совокупность основных. Так, абразивный износ может быть представлен как «резание + деформация»; эрозия жидкими средами – «деформация + усталость»; кавитация – «деформация + коррозия» и износ смазываемых поверхностей – «адгезия + коррозия».

Условия перехода от одного вида износа к другому зависят от условий трения и природы материала. При интенсивном износе преобладают адгезионный и абразивный механизмы разрушения материалов, частицы износа имеют вид осколков, а на поверхности трения образуются глубокие вырывы. Интенсивный износ сопряженных поверхностей – один из существенных каналов утечки материальных и энергетических ресурсов, поэтому разработке эффективных методов борьбы с ним в последнее время уделяется огромное внимание.

По данным 85...90 % машин выходят из строя по причине износа деталей, хотя за последние годы использование эффекта безыноса значительно расширилось. В настоящее время трудно указать область машиностроения или приборостроения, в которой избирательный перенос не был бы применен или апробирован. Избирательный перенос проявляется при трении: стали по стали и чугуну; чугуна по чугу; стали по порошковому материалу, металлополимеру, стеклу, бронзе, алюминиевым сплавам, композиционным и другим материалам.

При трении сопряженные поверхности изнашиваются одновременно, что приводит к изменению их взаимного положения. Износ сопряжения характеризуется изменением взаимного расположения сопряженных деталей. Доказано, что в зависимости от характера возможного сближения поверхностей все сопряжения подразделяются на две разновидности:

1 Сопряжения с изнашивающимися или малоизнашивающимися поверхностями, которые обеспечивают сближение деталей при износе только в заданном направлении;

2 Самоустанавливающиеся сопряжения, в которых взаимное положение деталей зависит от формы изношенной поверхности и износ наиболее значительно сказывается на функциональных свойствах пары.

1.4 Способы уменьшения интенсивности изнашивания в соединениях

Существует несколько методов повышения износостойкости соединений и деталей машин.

Накопленные мировой практикой методы и способы предотвращения износа в машинах можно разделить на следующие группы: материаловедческие; технологические; конструкционные; производственные и эксплуатационные.

Материаловедческие методы включают направленный синтез износостойких конструкционных и смазочных материалов, выбор рациональных конструкционных и смазочных материалов в соединениях, изучение и управление процессами, протекающими в материалах при изнашивании. При этом важно помнить, что износостойкость не является постоянным свойством материала, а проявляется в конкретных условиях и режимах эксплуатации. Материалы деталей и соединений помимо износостойкости должны обладать комплексом других свойств, обеспечивающих надежную работу конструкции в целом. Данные методы применяются на стадии разработки конструкции машин и основными направлениями повышения износостойкости машин при этом являются: выбор долговечных материалов деталей и их рациональное сочетание в парах трения; выбор надежной смазки трущихся поверхностей.

Технологические методы предупреждения износа основаны на больших технологических возможностях управления износостойкими свойствами деталей на этапе их производства. Основными технологическими направлениями повышения надежности являются: обеспечение необходимой точности изготовления деталей; обеспечение оптимального качества рабочих поверхностей (шероховатость, волнистость и др.); повышение износостойкости, статической и циклической прочности деталей термической обработкой; упрочнение деталей химико-термической обработкой (цементация,

азотирование и др.): упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием (обкатка или раскатка шариками и роликами, алмазное выглаживание, чеканка, дробеструйная обработка); нанесение на рабочие поверхности деталей машин износостойких покрытий (наплавка твердых сплавов, нанесение хромовых покрытий гальваническим методом и др.); установка втулок, колец и вставок из износостойких материалов; проведение искусственного старения чугуновых деталей (блоки цилиндров, головки цилиндров, корпуса задних мостов и коробок передач); статическая и динамическая балансировка деталей и сборочных единиц; повышение точности сборки и качества окраски агрегатов и машин в целом.

Конструкционные методы обеспечивают износостойкость на этапе проектирования машин, они направлены:

- на смягчение режимов работы материалов в деталях и узлах трения (уменьшение температуры, нагрузки, скорости);

- защиту трущихся деталей от контакта с абразивной и агрессивной средой;

- исключение режимов трения без смазочного материала или в условиях недостаточной смазки; компенсацию износа деталей; обеспечение равномерного изнашивания деталей;

- исключение катастрофических видов изнашивания деталей при схватывании и задире;

- обеспечение ремонтпригодности деталей и агрегатов.

Этого достигают: оптимизацией конструктивных схем машин (снижение числа составных частей и повышение вероятности их безотказной работы); обеспечением надлежащей конфигурации деталей (особенно в местах расположения галтелей, канавок и надрезов с целью снижения концентрации напряжений при воздействии динамических и циклических нагрузок) и достаточной жесткости и устойчивости к вибрациям базовых деталей машин; обеспечением надлежащей герметизации подвижных и неподвижных соединений деталей машин; создание оптимальных условий работы пар трения (нагрузка, скорость) для наименьших потерь на трение; обеспечением оптимальных температурных режимов работы соединений и агрегатов; создание эффективных устройств очистки воздуха, топлива и масел; заменой опор скольжения на опоры качения; применением разных способов смазки, различного рода уплотнений, за-

творов, фильтров, отстойников; доступностью и простотой обслуживания, ремонта и замены деталей и узлов.

Производственные и эксплуатационные методы обеспечения износостойкости реализуют в процессе производства и эксплуатации. На этапе создания техники необходимо обеспечить точное соблюдение технологии изготовления деталей и соединений в соответствии с заложенными в проект требованиями. В процессе изготовления контролируют следующие параметры: качество поверхностей трения; отклонение формы деталей; твердость поверхностей; точность сборки; биение; регламентированные зазоры.

С целью контроля износостойких показателей проводят стендовые ускоренные испытания отдельных деталей, соединений, агрегатов. Опытные образцы техники проходят полигонные и эксплуатационные испытания. На этих этапах устраняют возможные недоработки в износостойкости деталей, рабочих органов машины и регламентируют их режимы и условия эксплуатации.

Контрольные вопросы

1. Виды состояния изделия в период его эксплуатации.
2. Основные положения механической теории изнашивания.
3. Основные положения молекулярной теории изнашивания.
4. Основные положения молекулярно-механической теории изнашивания.
5. Виды трения и их особенности.
6. Причины адгезионного износа. Методы снижения адгезионного износа.
7. Причины абразивного износа. Методы снижения абразивного износа.
8. Причины коррозионного износа. Методы снижения коррозионного износа.
9. «Избирательный перенос» Д. Н. Гаркунова и И. В. Крагельского.

2 ВЫБОР СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Технологический процесс ремонта машин значительно сложнее процесса изготовления новых машин, так как он включает в себя все процессы машиностроительного производства, а именно: изготовление деталей, сборку, обкатку, окраску и т. д., а также дополнительные специфические процессы, выполняемые при ремонте – приемку машины в ремонт, очистку, мойку, разборку, дефектацию и др.

Источником экономии затрат при проведении ремонтно-обслуживающих работ машин по сравнению с их изготовлением является использование пригодных для дальнейшей эксплуатации деталей после их восстановления.

При изготовлении деталей машин заводы используют заготовки, получаемые литьём, штамповкой и другими способами. Стоимость материалов и заготовительных работ при изготовлении (производстве) новых машин составляет примерно 75 % затрат на их изготовление.

При восстановлении деталей затраты на материалы и заготовительные работы минимальны, т. е. роль заготовок при этом выполняют изношенные детали.

Износы большинства деталей измеряются очень малыми величинами, поэтому их восстановление сводится к наращиванию небольшого количества металла поверхностного слоя или механической обработке под требуемый ремонтный размер. Поэтому стоимость изношенных деталей после восстановления невысока.

Выбор рационального способа восстановления зависит от конструктивно-технологических особенностей рабочей поверхности деталей (формы и размера, материала и термообработки, поверхностной твердости и шероховатости), от условий их работы (характера нагрузки, вида трения) и износа, а также от стоимости восстановления.

Для учета всех этих факторов при выборе рационального способа рекомендуется последовательно пользоваться тремя критериями:

- технологическим (применимости);

- техническим (долговечности);
- технико-экономическим (отношением себестоимости восстановления к коэффициенту долговечности).

2.1 Выбор способа по технологическому критерию

Технологический критерий (критерий применимости) учитывает, с одной стороны, особенности подлежащих восстановлению поверхностей деталей, а с другой – технологические возможности соответствующих способов восстановления. Кроме этого, учитываются технологические возможности конкретного предприятия, где будет производиться восстановление (наличие оборудования, приспособлений, рабочих кадров, материалов и т. д.). Технологические возможности способов восстановления деталей устанавливаются по их характеристикам, которые даны в специальной справочной и технической литературе.

При этом можно пользоваться следующими рекомендациями [3].

1. Для восстановления деталей, образующих неподвижные соединения:

- при износе до 0,02 мм целесообразно применять электроискровое наращивание;

- при износе 0,02 – 0,08 мм целесообразно применять электроимпульсное наращивание или гальваническое покрытие.

2. Для восстановления деталей, образующих подвижные соединения рекомендуется:

- при износе до 0,5 мм применять хромирование или твёрдое остаивание;

- при износе 0,5 – 2,0 мм слой металла наиболее целесообразно наращивать вибродуговой наплавкой, наплавкой в среде CO₂, газопламенными методами или электроконтактным напеканием металлического порошка.

3. Для восстановления деталей подвижных сопряжений, работающих на принципе качения (перекатывания) поверхностей при абразивном изнашивании можно применять:

– при износе поверхности *до 0,6 мм* – электроимпульсное наращивание электродом, содержащим хром, ванадий, марганец (ХВГ);

– при износе *0,6–5 мм* – автоматическую электродуговую наплавку под слоем флюса порошковыми материалами или вибродуговую наплавку;

– при износе *более 5 мм* – электрошлаковую наплавку или заливку жидким металлом.

4. При восстановлении деталей двигателей внутреннего сгорания, ходовых систем тракторов и т. п. рекомендуемые способы могут быть следующие:

– гальваническое наращивание, с помощью которого целесообразно восстанавливать плунжерные пары топливных насосов высокого давления (ТНВД), гильзы цилиндров, поршневые пальцы, стержни клапанов, толкатели, посадочные места подшипников в чугунных корпусных деталях;

– электроискровое и электроимпульсное наращивание для восстановления посадочных мест под ступицы шкивов, шестерён, под кольца подшипников качения на валах и в корпусных деталях;

– электродуговую наплавку под слоем флюса проволокой или порошковыми ленточными электродами, которую используют для восстановления опорных катков и поддерживающих роликов гусеничного хода тракторов и комбайнов, звеньев гусениц, шатунных и коренных шеек коленчатых валов двигателей и т. п.;

– электроконтактное напекание металлическими порошками, которыми восстанавливают тарелки клапанов, шейки коленчатых валов карбюраторных двигателей и другие детали;

– вибродуговую наплавку и наплавку в среде защитных газов с последующей упрочняющей обработкой, которой восстанавливают шейки распределительных валов, оси катков, шлицы на валах КПП и задних мостов, коленчатые оси направляющих колес гусеничного хода, шпиндели токарных, шлифовальных, сверлильных станков и т. п.

Принципиальная возможность применения некоторых наиболее распространенных методов восстановления приведена в таблице 2.1 [2].

Таблица 2.1 – Технологические характеристики способов восстановления изношенных поверхностей

Способы восстановления	Исходные характеристики восстанавливаемых деталей							
	Виды металлов и сплавов, по отношению к которым применим способ	Виды поверхностей, по отношению к которым применим данный способ	Минимальный наружный диаметр поверхности, мм	Минимальный внутренний диаметр поверхности, мм	Минимальная толщина наносимого покрытия, мм	Максимальная толщина наносимого покрытия, мм	Применяемость к деталям, испытывающим знакопеременные нагрузки	
Наплавка в среде CO ₂	Сталь	1; 3	15	–	0,5	3,5	Применим	
Наплавка под слоем флюса			50	–	1,5	5		
Вибродуговая наплавка			Все материалы	15	–	0,5	3	Неприменим
Дуговая металлизация	30			–	0,3	3		
Газопламенное напыление	30			–	0,3	1,5		
Плазменное напыление или наплавка	30			–	0,3	3		
Хромирование	Сталь, чугун	1; 2	5	40	0,05	0,3	Применим	
Железнение			12	40	0,1	1,5		
Электроконтактная приварка металлического слоя	Все материалы		10	60	0,1	1,5		
Ручная наплавка			1; 2; 3	10	40	1		6
Электромеханическая обработка	Сталь		1	30	–	0,05		0,12
Обработка под ремонтный размер	Все материалы		1; 2; 3	Определяют по условиям прочности деталей		–		–
Установка дополнительной детали		–				–		
Пластическое деформирование		Сталь				–		–
Примечания: 1 – наружные цилиндрические поверхности; 2 – внутренние цилиндрические поверхности; 3 – плоские поверхности.								

На основании технологических характеристик устанавливают (выбирают) возможные способы восстановления различных поверхностей деталей по технологическому критерию, количество которых принимают равным 3–4 (обычно не более 3-х).

2.2 Выбор способа по техническому критерию

Для дальнейшего сокращения числа возможных способов восстановления пользуются *техническим критерием* (критерием долговечности), в соответствии с которым отбирают для последующего анализа только те из них, которые обеспечивают межремонтный ресурс восстановленной поверхности детали не ниже минимально допустимого.

При выборе рационального способа восстановления по критерию долговечности обычно пользуются *коэффициентом долговечности*, который является функцией четырёх переменных,

$$K_D = f(K_I, K_B, K_C, K_P), \quad (2.1)$$

где K_I – коэффициент износостойкости;

K_B – коэффициент выносливости;

K_C – коэффициент сцепляемости;

K_P – поправочный коэффициент, учитывающий фактическую работоспособность восстановленной детали в условиях эксплуатации.

Рассчитывают коэффициент долговечности по формуле:

$$K_D = K_I K_B K_C K_P. \quad (2.2)$$

Численные значения коэффициентов-аргументов определяют на основании стендовых и эксплуатационных испытаний новых и восстановленных деталей.

Примерные значения коэффициентов износостойкости, выносливости и сцепляемости, определенные по результатам исследований для наиболее распространенных методов восстановления и поправочного коэффициента, учитывающий фактическую рабо-

тоспособность, приведены в таблице 2.2 [2, 3], а краткая характеристика этих способов представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов, определяющих долговечность работы восстановленных деталей

Способ восстановления	K_H	K_B	K_C	K_P
Наплавка в среде CO_2	0,95	0,95	1,00	0,82
Вибродуговая наплавка	0,95	0,62	1,00	0,82
Наплавка под слоем флюса	1,10	0,82	1,00	0,86
Дуговая металлизация	1,15	0,80	0,70	0,80
Газопламенное напыление	1,15	0,80	0,70	0,80
Плазменное напыление	1,25	0,85	0,75	0,80
Хромирование (электролитическое)	1,15	0,85	0,70	0,90
Железнение (электролитическое)	1,10	0,80	0,70	0,80
Электроконтактная наплавка (приварка) металлического слоя	1,00	0,80	0,85	0,80
Ручная наплавка	1,00	0,80	1,00	0,80
Эпоксидные композиции	0,90	0,80	1,00	0,85
Электромеханическая обработка (высадка и сглаживание)	1,00	1,20	1,00	0,90
Обработка под ремонтный размер	1,00	1,00	1,00	0,88
Установка дополнительной детали	1,00	0,80	1,00	0,86
Пластическое деформирование	0,90	1,00	1,00	0,90

Из нескольких вариантов способа восстановления изношенной поверхности детали рациональным по коэффициенту долговечности будет тот, у которого он имеет максимальное значение при учете величины износа.

В зависимости от физической сущности процессов, протекающих при восстановлении деталей, технологических и других признаков существующие способы делят на десять групп (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Способы восстановления деталей при ремонте машин

Номер группы	Метод восстановления	Способ восстановления
1	2	3
1	Слесарно-механическая обработка	1.1 Обработка под ремонтный размер (РР). 1.2 Постановка дополнительной ремонтной детали. 1.3 Механическая обработка до выведения следов износа и придания правильной геометрической формы. 1.4 Перекомплектовка.
2	Пластическое деформирование	2.1 Вытяжка, оттяжка. 2.2 Правка (на прессах, наклёпом). 2.3 Механическая раздача. 2.4 Гидротермическая раздача. 2.5 Электрогидравлическая раздача. 2.6 Раскатка. 2.7 Механическое обжатие. 2.8 Термопластическое обжатие. 2.9 Осадка. 2.10 Выдавливание. 2.11 Накатка. 2.12 Электромеханическая высадка.
3	Нанесение полимерных материалов	3.1 Напыление: газопламенное; в псевдосжиженном слое (вихревое, вибрационное, вихревое) и др. 3.2 Опрессовка. 3.3 Литье под давлением. 3.4 Наружное нанесение покрытий (грунтовка, шпатлевка).
4	Ручная сварка и наплавка	4.1 Газовая. 4.2 Дуговая. 4.3 Аргонодуговая. 4.4 Кузнечная. 4.5 Плазменная. 4.6 Термитная. 4.7 Контактная.

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3
5	Механизированная дуговая сварка и наплавка	5.1 Автоматическая под флюсом. 5.2 В среде защитных газов. 5.3 Дуговая с газопламенной защитой. 5.4 Вибродуговая. 5.5 Порошковой проволокой или лентой. 5.6 Широкойслоная. 5.7 Лежачим электродом. 5.8 Плазменная (сжатой дугой). 5.9 Многоэлектродная. 5.10 С одновременным деформированием.
6	Механизированные бездуговые способы сварки и наплавки	6.1 Индукционная (высокочастотная). 6.2 Электрошлаковая. 6.3 Контактная сварка и наварка. 6.4 Трением. 6.5 Газовая. 6.7 Ультразвуковая. 6.8 Диффузионная. 6.9 Лазерная. 6.10 Термитная. 6.11 Взрывом. 6.12 Магнитно-импульсная.
7	Газотермическим нанесением (металлизация)	7.1 Дуговое. 7.2 Газопламенное. 7.3 Плазменное. 7.4 Детонационное. 7.5 Высокочастотное. 7.6 Электроимпульсное. 7.7 Ионно-плазменное.
8	Гальваническим и химическим покрытием	8.1 Железнение постоянным током. 8.2 Железнение переменным током. 8.3 Железнение проточное. 8.4 Железнение местное (вневанное). 8.5 Хромирование. 8.6 Хромирование проточное, струйное. 8.7 Меднение. 8.8 Цинкование. 8.9 Нанесение сплавов. 8.10 Нанесение композиционных покрытий. 8.11 Электроконтактное нанесение (электронатирание). 8.12 Гальваномеханический способ. 8.13 Никелирование.

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3
9	Термической и химикотермической обработкой	9.1 Закалка, отпуск. 9.2 Диффузионное борирование. 9.3 Диффузионное цинкование. 9.4 Диффузионное титанирование. 9.5 Диффузионное хромирование. 9.6 Диффузионное хромотитанирование. 9.7 Диффузионное хромоазотирование. 9.8 Обработка холодом.
10	Другие способы	10.1 Заливка жидким металлом. 10.2 Намораживание. 10.3 Напекание. 10.4 Пайка. 10.5 Пайкосварка. 10.6 Электроискровое наращивание, легирование.

Характеристика способов восстановления

1 группа – износы поверхностей деталей этой группы устраняют слесарной или механической обработкой с изменением их первоначальных размеров.

Для восстановления соединений и получения необходимых посадок используют сопрягаемые детали с измененными конструктивными параметрами или устанавливают компенсаторы износа (кольца, втулки, бандажи и т. п.). Дополнительные детали могут устанавливать с натягом, с помощью пайки, сварки или склеивания (рисунок 2.1). После установки дополнительную деталь могут подвергнуть механической обработке.

Иногда изношенную поверхность детали обрабатывают до придания ей правильной геометрической формы (нажимные диски муфт сцепления, тормозных барабанов, плоскости головок цилиндров).

2 группа – изношенные поверхности деталей восстанавливают за счет перераспределения металла от нерабочих участков детали к рабочим. Достоинство способов заключается в их простоте, высо-

ких производительности и качестве, при этом не требуется присадочный материал.

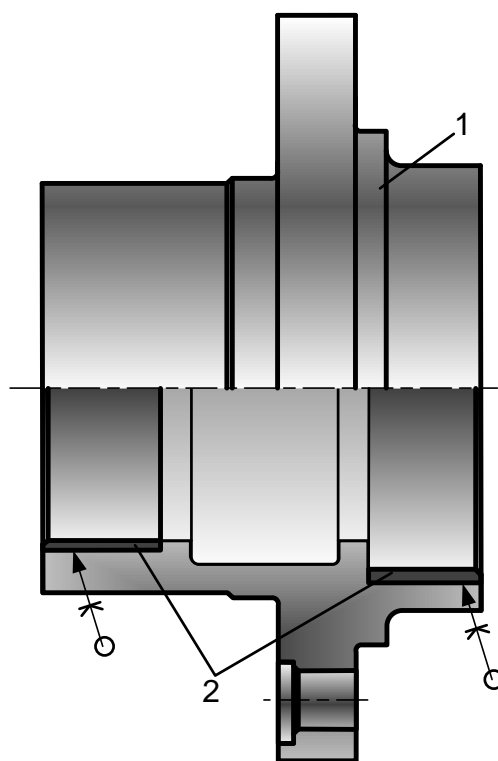


Рисунок 2.1 – Схема восстановления гнезд под подшипник постановкой дополнительных деталей:
1 – деталь; 2 – дополнительные приклеенные втулки

3 группа – изношенные поверхности деталей восстанавливают путем нанесения полимерных материалов. Достоинство способов определяется их простотой и доступностью, низкой себестоимостью, высокими производительностью и качеством.

4 группа – восстановление осуществляется путем нанесения расплавленного металла или соединения им сопрягаемых деталей. Способы доступны, но материалоемки, малопродуктивны, не всегда обеспечивает нужного качества.

5 группа – способы восстановления могут быть автоматическими и полуавтоматическими. Большинство этих способов обеспечивают высокие производительность и качество.

Автоматическая наплавка под слоем флюса (рисунок 2.2) – один из прогрессивных и широко применяемых способов восстановления деталей на ремонтных предприятиях.

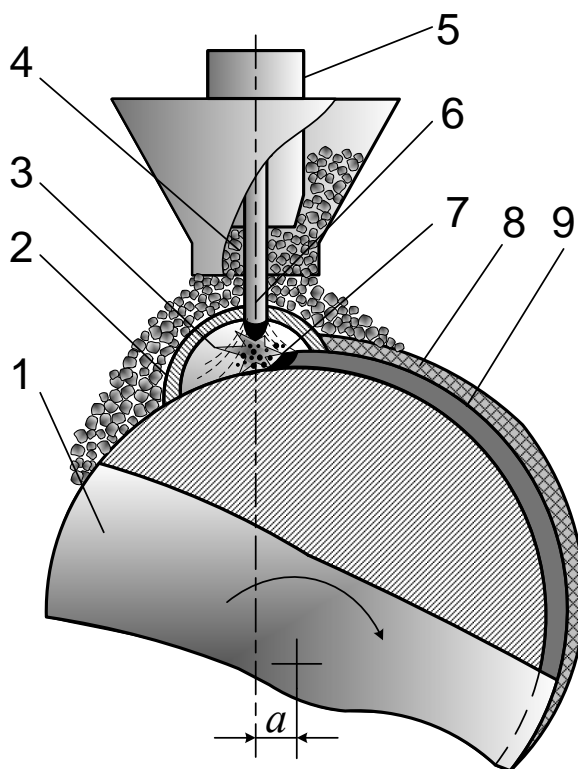


Рисунок 2.2 – Схема автоматической наплавки под слоем флюса:
 1 – деталь; 2 – слой флюса; 3 – газовое пространство; 4 – бункер с флюсом;
 5 – мундштук; 6 – электрод; 7 – электрическая дуга; 8 – шлаковая корка;
 9 – наплавленный слой (шов)

Сущность этого способа заключается в следующем. К дуге 7, образующейся между электродом 6 и поверхностью вращающейся детали 1, через мундштук 5 специальным устройством (автоматом) непрерывно подается электродная проволока 6, а из бункера 4 насыпается гранулированный флюс. Дуга, утопленная в массе флюса, горит под жидким слоем 2 расплавленного флюса в газовом пространстве 3. Жидкий слой 2 флюса надежно предохраняет расплавленный металл от окружающего воздуха, уменьшает разбрызгивание металла, улучшает формирование шва 9, повышает использование теплоты дуги и материала электродной проволоки. Шлаковая корка 8, образующаяся при остывании, замедляет охлаждение расплавленного металла и улучшает условия формирования его структурных превращений.

Во многих случаях, когда затруднительно, невозможно или слишком дорого применять сварку под слоем флюса, используют другие защитные среды: аргон, углекислый газ, пар и т. п. Наи-

большее применение в ремонте машин получила автоматическая наплавка в среде углекислого газа.

Сущность процесса наплавки в среде углекислого газа заключается в следующем. Газ подается в зону сварки из специальных горелок, монтируемых на автоматических сварочных головках, а также с помощью специальных аппаратов, предназначенных для сварки в среде углекислого газа. Из баллона по трубке (рисунок 2.3) углекислый газ поступает в сопло горелки 3, прикрепленной к мундштуку 1. Омывая наконечник 4 и электродную проволоку 2, углекислый газ оттесняет воздух и защищает зону сварки от воздействия азота и кислорода.

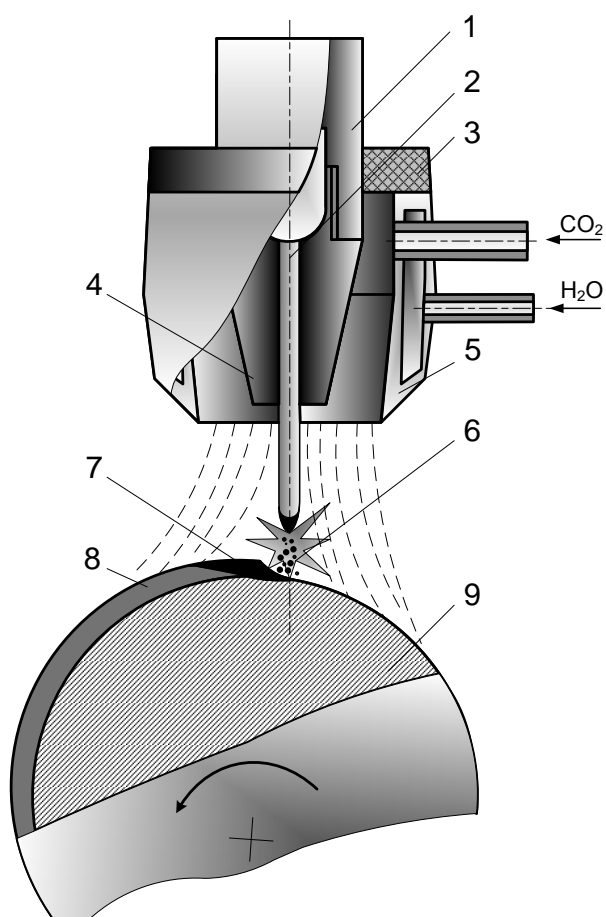


Рисунок 2.3 – Схема автоматической наплавки в среде углекислого газа:

1 – мундштук; 2 – электрод; 3 – горелка; 4 – наконечник; 5 – сопло;

6 – электрическая дуга; 7 – сварочная ванна;

8 – наплавленный металл; 9 – наплавляемая деталь

Плазменная наплавка основана на использовании тепла плазменной струи, которая представляет собой поток ионизированных частиц газа, обладающих большой энергией (рисунок 2.4).

Для получения плазменной струи между катодом и анодом возбуждают электрическую дугу от источника постоянного тока. Электрическая дуга, горящая между катодом и анодом, нагревает подаваемый в плазмотрон газ до температуры плазмы, т. е. до состояния электропроводности. В поток нагретого газа вводят материал для сварки и наплавки. Образующиеся расплавленные частицы материала выносятся потоком горячего газа из сопла и наносятся на поверхность изделия. В качестве плазмообразующих газов используют аргон, азот, гелий и аргон-азотную смесь.

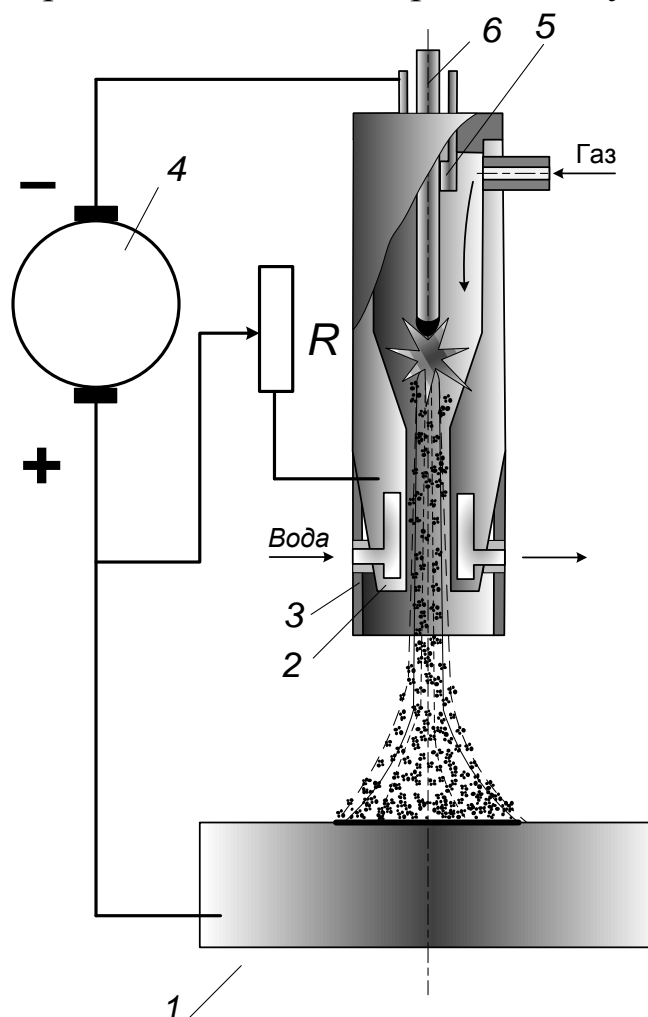


Рисунок 2.4 – Схема плазменной горелки прямого действия:
1 – восстанавливаемая деталь; 2 – водоохлаждаемое сопло;
3 – газозащитное сопло; 4 – источник питания;
5 – камера для плазмообразующего газа; 6 – электрод

6 группа – для восстановления изношенных поверхностей деталей используют присадочный материал, плавление которого осуществляют, используя тепло электрической дуги или других источников.

При бездуговых способах таким источником служат потери от вихревых токов высокой частоты (ТВЧ), джоулева теплота (электрошлаковая наплавка, контактная приварка), теплота сгораемых газов и др.

Ручные и механизированные сварочно-наплавочные способы получили наибольшее применение (75–80 % общего объема восстановления). Их недостатки – термическое воздействие на основной металл, в том числе на невосстанавливаемые поверхности, деформация деталей, значительные припуски на механическую обработку. Применение большинства из этих способов целесообразно для восстановления сильноизношенных деталей.

7 группа – восстановление изношенных поверхностей деталей осуществляется путем напыления расплавленной присадочный материал (проволока или порошок) с помощью сжатого воздуха, который распыляется и наносится на подготовленную поверхность детали. Способы напыления различают в зависимости от источника теплоты: дуговое – используется теплота электрической дуги, газопламенное напыление – используется теплота газового пламени и т. д. Этим способом напыляют металлы, полимеры и др. При напылении металла процесс называют металлизацией. Большинство способов напыления характеризуется высокой производительностью, позволяет достаточно точно регулировать толщину покрытия и припуск на механическую обработку. Серьезный недостаток напыления – низкая сцепляемость покрытий с основой. Для ее повышения применяют нанесение специального подслоя, последующее оплавление и др.

Электродуговая металлизация находит все большее применение на ремонтных предприятиях (рисунок 2.5). Две изолированные одна от другой проволоки *1* подаются с одинаковой скоростью специальным механизмом *2*. При выходе из наконечников *3* между проволоками зажигается электрическая дуга. Газ, подаваемый под давлением по каналу *4* в зону дуги *5*, распыляет расплавленный металл и напыляет его на деталь *6*.

При газопламенной металлизации напыляемый металл расплавляется пламенем горючего газа (ацетилена, пропан-бутана и др.) и кислорода, а распыляется сжатым воздухом или инертным газом.

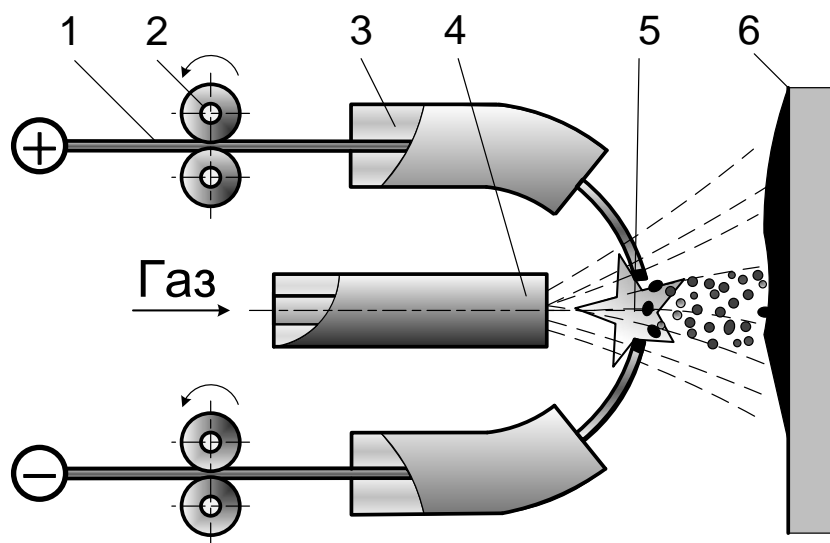


Рисунок 2.5 – Схема электродуговой металлизации:
 1 – электродная проволока; 2 – механизм подачи проволоки;
 3 – наконечник; 4 – канал для газа; 5 – электрическая дуга; 6 – деталь

Газопламенная металлизация позволяет получать сравнительно высокое качество покрытий при незначительном выгорании легирующих элементов. Газопламенные аппараты (металлизаторы) по виду используемого присадочного материала можно разделить на проволочные и порошковые (рисунки 2.6 и 2.7).

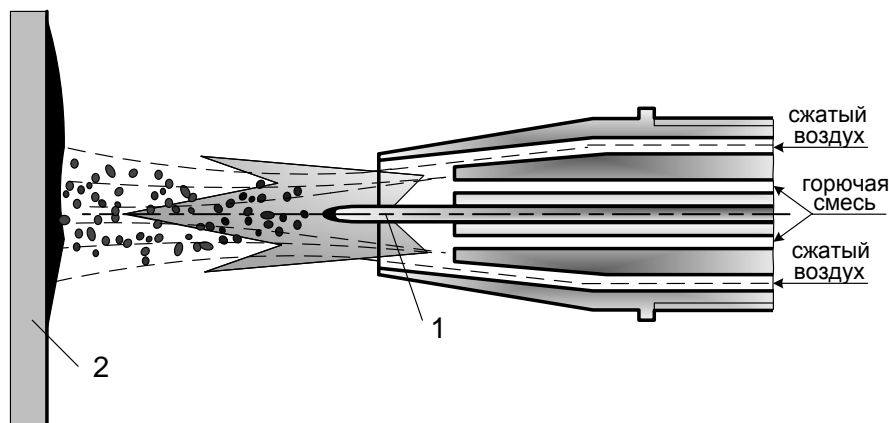


Рисунок 2.6 – Схема устройства проволочной газопламенной распылительной головки:
 1 – электродная проволока; 2 – наплавляемая деталь

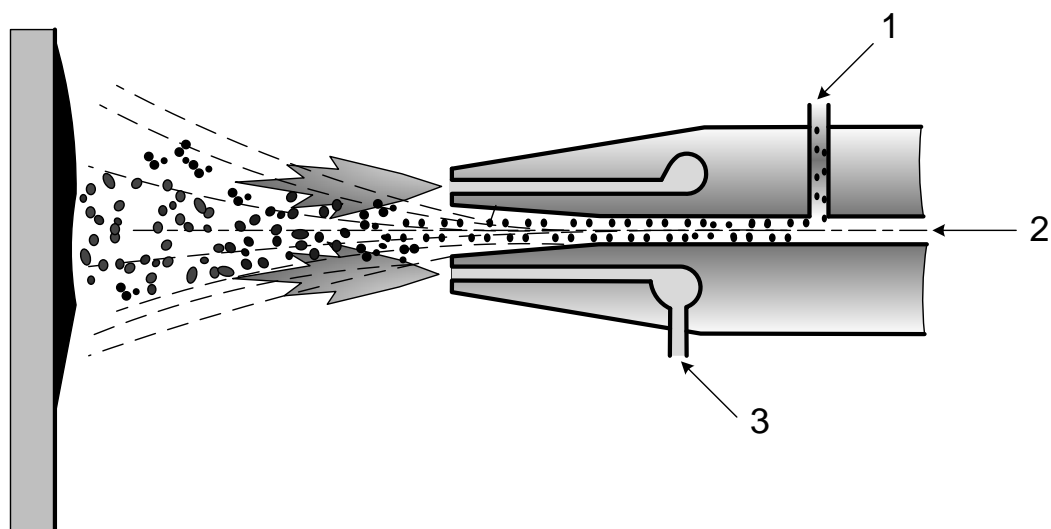


Рисунок 2.7 – Схема устройства порошковой газопламенной распылительной головки:

1 – напыляемый порошок; 2 – сжатый воздух; 3 – горючая смесь

8 группа – в основе гальванических способов восстановления изношенных поверхностей деталей лежит явление электролиза. Их различают по виду осаждаемого металла, роду используемого тока, способу осаждения и др. Гальванические способы высокопроизводительны, не оказывают термического воздействия на деталь, позволяют точно регулировать толщину покрытий и свести к минимуму или вовсе исключить механическую обработку, обеспечивают высокое качество покрытий при дешевых исходных материалах. Такие способы применяют для восстановления малоизношенных деталей. Недостатки гальванопокрытий – многооперационность, сложность и экологическая вредность технологии.

При прохождении постоянного электрического тока через электролит (раствор солей, кислот или щелочей) в последнем образуются положительно заряженные ионы электролита (катионы) и отрицательно заряженные (анионы). Катионы водорода и металла движутся к катоду и образуют на нем металлический осадок (отложение) или выделяются в виде газа (рисунок 2.8).

Металлический осадок, выделяющийся на катоде, называют электрическим (гальваническим) покрытием.

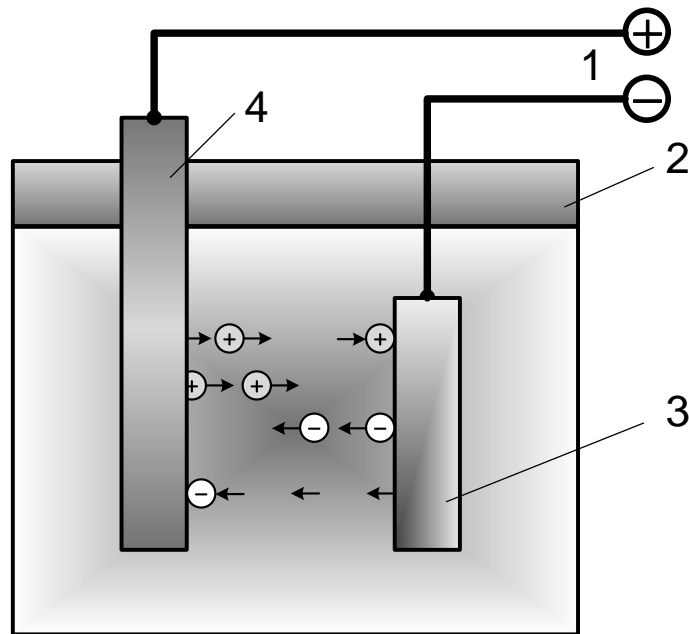


Рисунок 2.8 – Схема процесса электролитического наращивания металлов:
 1 – источник тока; 2 – ванна; 3 – катод; 4 – анод

Местное железнение, как один из гальванических способов, применяют для восстановления посадочных поверхностей корпусных деталей. Поверхность детали, подготовленную к железнению, травят раствором соляной кислоты и промывают. Затем монтируют местную «ванну» (рисунок 2.9), состоящую из резиновой прокладки 2 толщиной 3–5 мм и диаметром на 20–30 мм больше восстанавливаемого отверстия, внизу которой устанавливают алюминиевую или стальную крышку 3 и прижимают их распорной гайкой 4 к отверстию. Устанавливают электрод из малоуглеродистой стали и заливают электролит. Подключают деталь к аноду и производят железнение.

Способом железнения восстанавливают поворотные кулаки, шкворни, крестовины дифференциалов, валы сошек рулевого управления, кронштейн передней рессоры.

Электролитическое осаждение железа можно вести и вневаннным способом. Оно позволяет восстанавливать отдельные изношенные отверстия в крупногабаритных деталях (блоки цилиндров, корпуса коробок передач задних мостов и т. д.). Кроме того, вневаннное железнение позволяет повысить производительность процесса за счет циркуляции электролита и увеличения плотности тока.

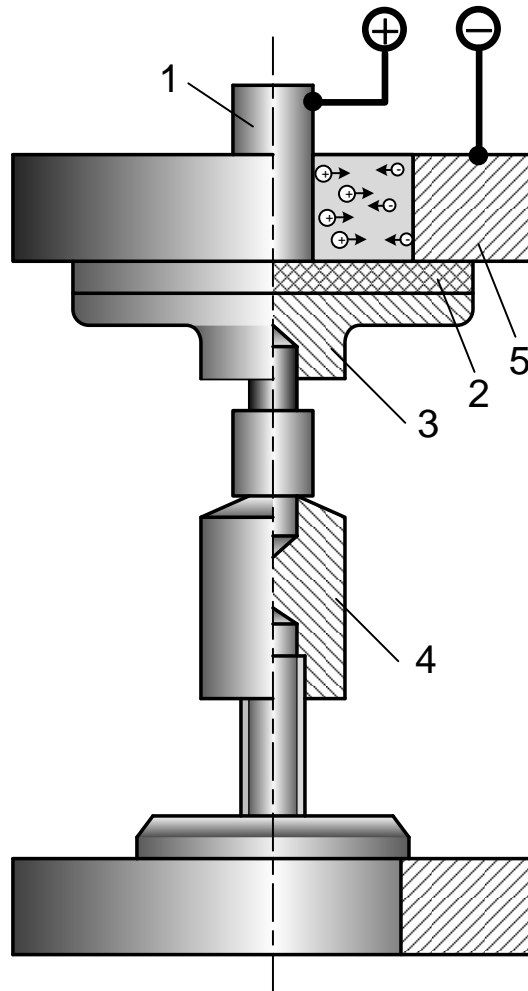


Рисунок 2.9 – Приспособление для местного железнения:
 1 – анод; 2 – резиновая прокладка; 3 – крышка; 4 – распорная гайка;
 5 – восстанавливаемая деталь

Электролитическое натирание – один из способов нанесения покрытий вневанным способом. Деталь 7 (рисунок 2.10), подключенную к катоду, закрепляют в шпинделе или в центрах токарного станка.

Анодом 3 служит угольный стержень, обернутый специальным адсорбирующим материалом и образующий тампон 4. Электролит поступает из резервуара и в течение всего процесса подпитывает тампон 4. Расход электролита регулируют краном 2.

Непрерывное поступление электролита на анодный тампон и перемещение анода по покрываемой поверхности детали дают возможность применять высокую плотность тока и обеспечивают повышенную производительность.

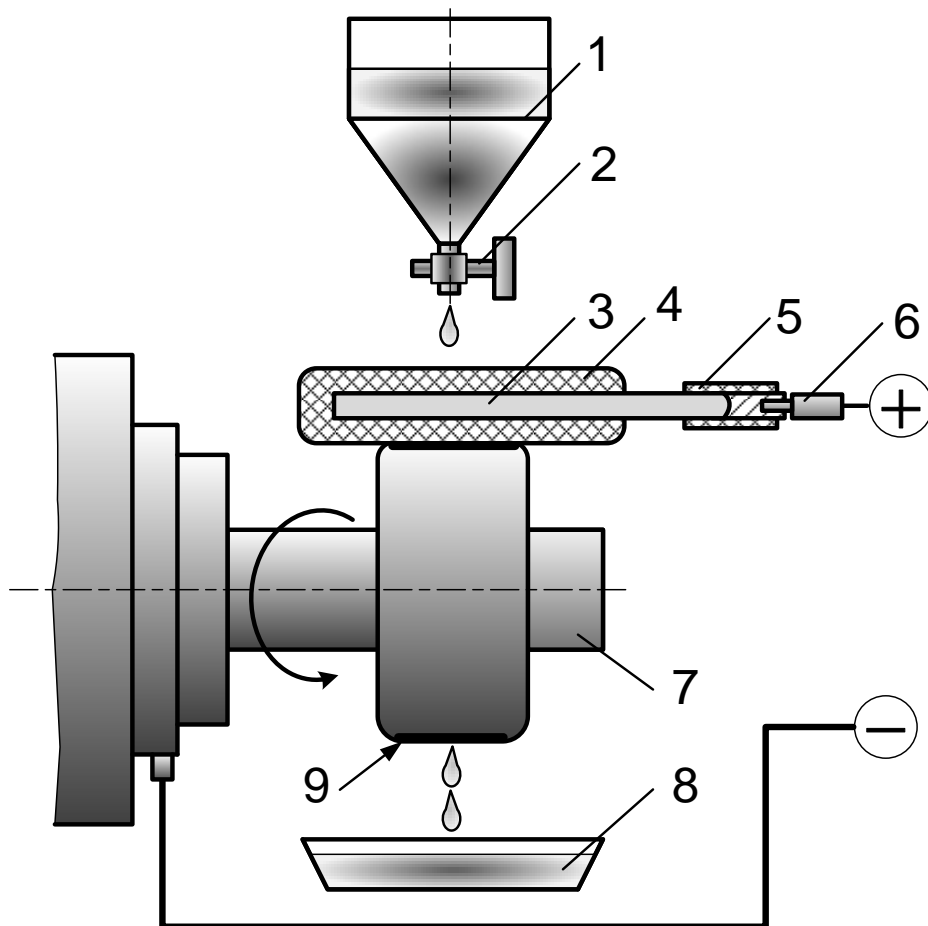


Рисунок 2.10 – Схема процесса электролитического натирания:
 1 – резервуар для электролита; 2 – кран; 3 – анод; 4 – тампон;
 5 – рукоятка; 6 – штекер; 7 – деталь;
 8 – ванна; 9 – восстанавливаемая поверхность

9 группа – термическую обработку при восстановлении изношенных поверхностей деталей применяют для упрочнения и восстановления физико-механических свойств деталей (упругости пружин и др.). При химико-термических способах происходит диффузное насыщение поверхности детали тугоплавкими металлами (хромом, титаном и др.) при некотором изменении размеров. Эти способы применяют для восстановления и повышения износостойкости малоизношенных деталей (плунжеров и др.).

10 группа – при восстановлении сильно изношенных деталей или при заделке крупных местных дефектов в отливках используют заливку жидким металлом. Заливкой жидким металлом целесообразно восстанавливать крупногабаритные изделия или значи-

тельное количество мелких однотипных деталей. Этот способ обеспечивает высокие производительность и качество.

Электроконтактное напекание металлических порошков применяется для восстановления деталей типа валов и осей. Между вращающейся деталью 4 (рисунок 2.11), установленной в шпиндель токарного станка, и медным роликом-электродом 2 подают присадочный порошок 3. Ролик 2 при помощи пневмо- или гидроцилиндра 1 прижимается к детали. При прокатывании детали и ролика и в результате большого электрического сопротивления в месте их контакта порошок нагревается до температуры 1000–1300 °С. Раскаленные частицы порошка спекаются между собой и с поверхностью детали.

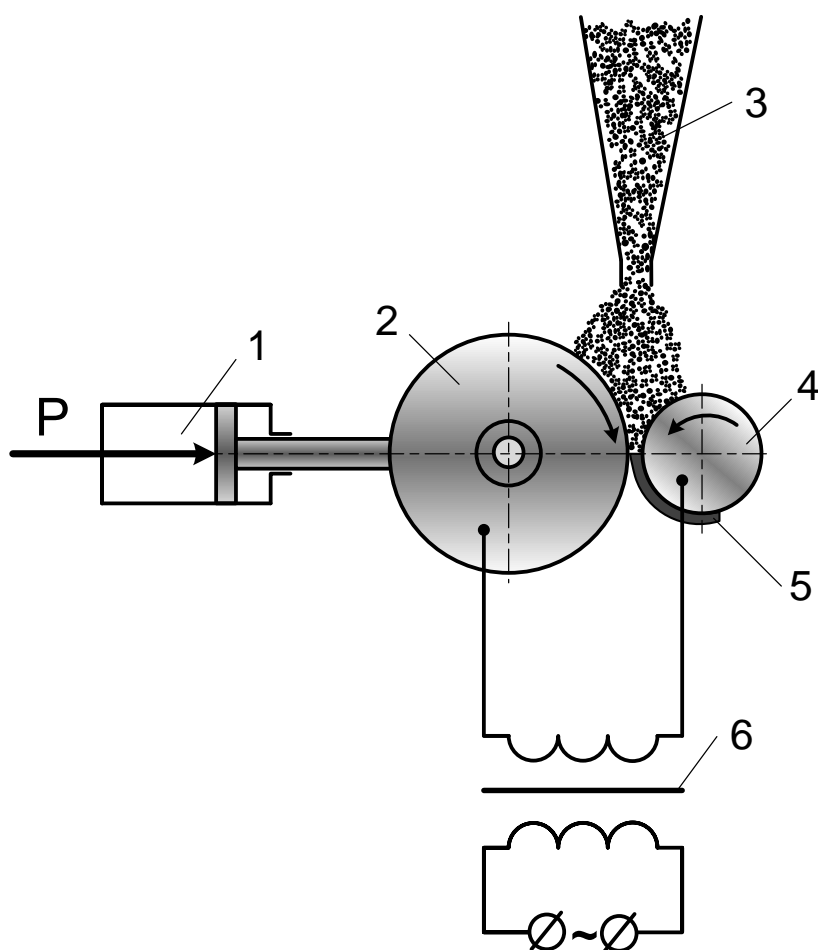


Рисунок 2.11 – Схема электроконтактного напекания металлических порошков:

- 1 – силовой цилиндр; 2 – ролик; 3 – металлический порошок;
4 – деталь; 5 – напекаемый слой; 6 – трансформатор;
P – прижимное усилие

Электроискровая обработка металлических поверхностей основана на использовании электрических разрядов между электродами в газовой среде. Сущность технологии восстановления поверхностей состоит в том, что в промежутке между металлическими электродами разрушается материал анода, продукты эрозии переносятся на катод (заготовку). Нанесение твердых износостойких покрытий этим способом толщиной до 0,1 мм относят к упрочнению, а нанесение покрытий большей толщины – к наплавке. Способ применяют для восстановления шеек валов и осей, поверхностей отверстий под подшипники, упрочнения взамен термообработки трущихся поверхностей, создания износостойкого поверхностного слоя толщиной 0,5 мм.

Электромеханическую обработку применяют для восстановления валов и осей с небольшими износами, а также как заключительную операцию при обработке деталей. Схема этого способа показана на рисунке 2.12. К детали 5, установленной в патроне 4 токарного станка и поддерживаемой центром задней бабки через электроконтактное приспособление 3 подводят один провод от вторичной обмотки трансформатора; другой провод подводят к инструменту 7 или 8, изолированно установленному в резцедержателе суппорта станка. В зону контакта детали и инструмента подводят ток, величина которого регулируется реостатом 2. Ток мгновенно нагревает металл в зоне контакта до высокой температуры; в результате улучшается качество обработки, а последующий быстрый отвод теплоты внутрь детали способствует закалке поверхностного слоя. Нагретый в зоне контакта металл выдавливается, образуя выступы, аналогичные резьбе. В результате диаметр детали D_2 увеличивается до размера D_1 . Вторым проходом сглаживающего инструмента высаженную поверхность обрабатывают до необходимого размера.

Этим способом можно получить шероховатость поверхности порядка $Ra = 1,6$ мкм (как при шлифовании) и одновременно значительно улучшить механические свойства поверхностного слоя обрабатываемой детали за счет его закалки на глубину до 0,1 мм. Этим способом восстанавливают преимущественно поверхности валов неподвижных соединений (посадочные места под подшипники, стержни, шкивы и др.) с износами не более 0,25 мм. Восста-

новленная поверхность получается прерывистой, и площадь контакта уменьшается.

Если площадь контакта остается более 60 % от первоначальной сплошной, то прочность сопряжения с гладкой поверхностью втулки (кольца подшипника) оказывается вполне достаточной благодаря более высокой твердости, полученной при обработке.

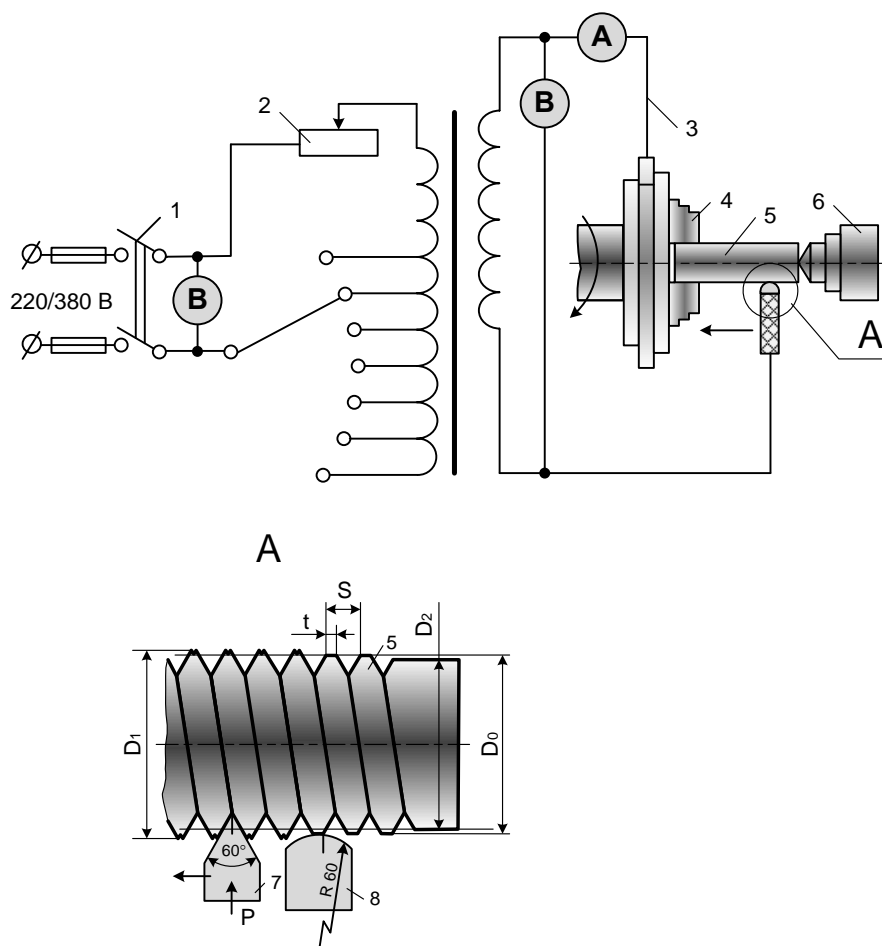


Рисунок 2.12 – Схема восстановления детали электромеханической обработкой:

- 1 – рубильник; 2 – реостат; 3 – провод вторичной обмотки;
- 4 – патрон станка; 5 – деталь; 6 – задняя бабка станка;
- 7 – высаживающий инструмент; 8 – сглаживающий инструмент

Безотказность машин определяется также стабильностью ресурсов восстановленных деталей, которая зависит от правильного выбора способа восстановления и строгого соблюдения технологического процесса. В таблице 2.4 приведена основная номенклатура и некоторые распространенные способы, оборудование и материалы для восстановления деталей.

Таблица 2.4 – Основная номенклатура, способы, оборудование и материалы для восстановления деталей

Наименование деталей	Основные дефекты	Способ восстановления	Предлагаемое оборудование	Материал покрытия
Гильзы цилиндров	Износ внутренней поверхности	Электроконтактная приварка материалов	Установка 01-11-022М	Лист Сталь 40Х (Сталь 45)
		Постановка свертных втулок	Установка 011-1-06	Лист или лента У7А (У10А)
		Ремонтный размер	Станки: расточной 278 (279Н), хонинговальный 3М33 (3А83)	
Гильзы цилиндров	Износ верхнего бурга	Газопламенное напыление	Установка 011-1-09 (установка ОКС-5531)	Порошок ПТ-19Н-04 ПГ-19М-01
	Износ посадочных поясков	Газопламенное напыление	Установка 011-1-09 (установка ОКС-5531)	Порошок ПТ-19Н-04 ПГ-19М-01
	Валы коленчатые	Износ коренных и шатунных шеек	Электродуговая наплавка под слоем флюса	Установка У-653 (установка 011-1-00 «Ремдеталь»)
Плазменно-дуговое напыление			Установка УН-126	Порошок ПХ20Н80
Наплавка порошковой проволокой			Станок У-653М (УД-209)	Порошковая проволока ПП-Нп40Х4Г2СМТФ
Пальцы поршневые	Износ по наружному диаметру	Ремонтный размер	Станок 3А423 (3В423)	
		Наплавка полуавтоматическая в среде углекислого газа	Установка А-547У	Проволока Св-18ХГА
		Термораздача	Установка 01.01-153М	

Продолжение таблицы 2.4

Наименование деталей	Основные дефекты	Способ восстановления	Предлагаемое оборудование	Материал покрытия
Головки цилиндров	Трещины	Сварка полуавтоматическая	Установка А-547У	Проволока ПАНЧ-11
		Аргондуговая сварка	УДГ-301	Электрод ОЗА-2
	Коробление	Шлифование	Станок ЗБ722	
Блоки цилиндров	Износ коренных опор	Электроконтактная приварка материалов	Установка 01-12.280 (установка 011-1-11)	Лист Сталь 30
		Аргондуговая наплавка	УДГ-301	ОЗА-2
	Износ поверхностей под гильзы	Ремонтный размер	Станок расточной ОР-14579 (ОР-4592)	
		Расточка, постановка втулок	Станок вертикально-расточной 2Е78Н	Лист Ст3
Распылители форсунок	Трещины	Сварка полуавтоматическая	Установка А-547У	Проволока ПАНЧ-11
		Аргондуговая сварка	УДГ-301	Электрод ОЗА-2
	Износ конусов иглы и корпуса	Шлифование + притирка	Станок ЛЗ-290 (станок ДВ-2)	Паста АСМ
Валы распределительные	Износ кулачков	Плазменная наплавка	Установка 05.12.351	Проволока ПГ-ХН80СР3
	Износ опорных шеек	Плазменная наплавка	Установка 05.12.351	Проволока ПГ-У30Х28М
		Ремонтный размер	Круглошлифовальный станок 3А433	
Клапаны впускной, выпускной	Износ фасок	Индукционная наплавка	Автомат 01.03.172 (полуавтомат АНК-4)	Порошок ПХ20Н80-1
		Плазменная наплавка	Установка ОКС-11192	Порошок ПР-Н77Х15С3Р2

Продолжение таблицы 2.4

Наименование	Основные дефекты	Способ восстановления	Предлагаемое	Материал покрытия
Крестовины карданных передач	Износ поверхностей под роликоподшипники	Раздача	Установка 17.418	
	Износ поверхностей под вкладыши	Гальванические покрытия Ремонтный размер	Установка 0013-040	Хлористое железо
Шатуны	Износ отверстий под подшипники, гнезд под стартер, трещины	Аргондуговая наплавка	Установка УДГ-301	Электроды ОЗА-2
	Износ шлицев	Электродуговая наплавка	Установка 01.06-152	Проволока НП-30ХГСА
Вилки скользящие (фланец вилки)	Износ внутренних поверхностей под подшипники	Наплавка полуавтоматическая в среде углекислого газа	Полуавтомат А-547У	Проволока Св-18ХГА
	Износ ободов	Электродуговая наплавка	УД-302	Проволока Св-18ХГА
Колеса направляющие	Износ поверхностей под подшипники	Электродоконтактная приварка материалов	01-11-022М	Лист Сталь 30
	Износ зубьев	Наплавка полуавтоматическая в среде углекислого газа	А-547У	Проволока НП-30ХГСА
	Износ отверстий под вал	Электродоконтактная приварка материалов	А-547У	Проволока НП-30ХГСА
Оси направляющие колес	Износ поверхностей подшипников под втулки и подшипники	Электродоконтактная приварка материалов	01-11.022М	Лист Сталь 30

Продолжение таблицы 2.4

Наименование деталей	Основные дефекты	Способ восстановления	Предлагаемое оборудование	Материал покрытия
Балансиры внешних и внутренних	Износ поверхностей под подшипники и втулки	Электроконтактная приварка материалов	01-00-022М	Лист Сталь 30
	Оси катков опорных	Электроконтактная приварка материалов	01-11-022М	Лист Сталь 30
Валы ведущих мостов, полуоси	Износ шлицев	Электродуговая наплавка	01.06-1152	Проволока Св-18ХГА
	Износ поверхностей под подшипники	Электроконтактная приварка материалов	01-11-022М	Лист Сталь 30
Катки опорные	Износ обода	Электродуговая наплавка	УД-302	Проволока Нп-50
	Износ поверхности отверстия под ось	Постановка втулки		Лист Сталь 30
Барабаны и шкивы тормозные	Износ и задиры на рабочей поверхности	Электродуговая наплавка	У-653	Электрод СЗЧ-2
	Износ шлицев	Электродуговая наплавка	01.06-152	Проволока Св-18ХГА
Валы коробок передач	Износ поверхностей под подшипники	Электроконтактная приварка материалов	01-11-022М	Лист Сталь 30
	Износ шлицев	Электродуговая наплавка	01.06-152	Проволока Св-18ХГА
Валы муфт сцепления	Износ поверхностей под подшипники	Электроконтактная приварка материалов	01-11-022М	Лист Сталь 30

Продолжение таблицы 2.4

Наименование деталей	Основные дефекты	Способ восстановления	Предлагаемое оборудование	Материал покрытия
Корпуса трансмиссий	Износ поверхностей под подшипники	Электроконтактная приварка материалов	01-11-022М	Лист Сталь 30
	Трещины	Сварка полуавтоматическая	А-547У	Электрод ПАНЧ-11
Полурамы тракторов	Износ отверстий вертикального шарнира, отверстий под шарнир гидроцилиндров	Расточка, постановка втулок		Лист Сталь 30
Трубы шарниров	Износ отверстий под палец	Расточка, постановка втулок		Лист Сталь 30
Диск нажимной	Износ поверхностей под уплотнительные кольца	Постановка свертных втулок	011-1-06	Лента Сталь 65Г
Опора промежуточная	Износ шлицев вала	Электродуговая наплавка	01.06-152	Св-18ХГА
	Износ поверхностей под подшипники	Электроконтактная приварка материалов	01-11-022М	Лист Сталь 30
	Трещины корпуса	Сварка полуавтоматическая	А-547У	Электроды ПАНЧ-11
Диски вала ведущего коробки передач	Износ по толщине, коробление	Термофиксация, шлифование	Эл. печь, станок плоскошлифовальный 3Д756	

2.3 Выбор способа по технико-экономическому критерию

Для окончательного выбора способа или, если установлено, что требуемому значению коэффициента долговечности для данной поверхности детали удовлетворяют несколько способов восстановления, оптимальный из них выбирают по технико-экономическому критерию, численно равному отношению себестоимости восстановления к коэффициенту долговечности для этих способов.

В качестве рационального в этом случае принимают тот способ, который обеспечивает минимальное значение *технико-экономического критерия*:

$$K_{Эi} = \frac{C_{Bi}}{K_{Ди}} \rightarrow \min, \quad (2.3)$$

где $K_{Эi}$ – технико-экономический критерий i -го способа восстановления;

C_{Bi} – затраты на восстановление поверхности детали i -м способом, р.;

$K_{Ди}$ – коэффициент долговечности восстановленной поверхности i -м способом.

В затраты на восстановление поверхности входят: заработная плата производственных рабочих с начислениями, стоимость машино-часа работы оборудования, расходы на материалы, электроэнергию, сжатый воздух, амортизационные отчисления и т. д.

Если затраты на восстановление поверхности заранее неизвестны, то их можно определить аналитическим путем, используя формулу:

$$C_{Bi} = C_{yi} SK_{ИНФ}, \quad (2.4)$$

где C_{yi} – удельная себестоимость восстановления единицы площади изношенной поверхности i -тым способом, р/см²;

S – площадь восстанавливаемой поверхности, см²;

$K_{ИНФ}$ – коэффициент годовой инфляции, учитывающий изменение удельной себестоимости восстановления поверхности в связи с уровнем инфляции.

Удельная себестоимость восстановления колеблется в достаточно больших пределах и зависит от технологических возможностей конкретного ремонтного предприятия.

Примерные значения удельной себестоимости восстановления поверхностей различными способами исследователями определены в 2007 г. Они приведены в таблице 2.5 [2].

В случае отсутствия данных по себестоимости рекомендуется брать ее среднее значение из таблицы с поправкой на коэффициент инфляции.

Коэффициент инфляции к ценам 2007 г. и в последующие годы можно выбрать из справочной литературы или Интернета. Они также приведены в таблице 2.6. На сентябрь 2016 г. Этот коэффициент $K_{ИНФ} = 1,36$ [4].

Таблица 2.5 – Удельная себестоимость восстановления изношенных поверхностей деталей наиболее распространенными способами

Способ восстановления	Удельная себестоимость восстановления C_y , р/см ²
Наплавка в среде CO ₂	0,6–0,8
Вибродуговая наплавка	0,8–1,0
Наплавка под слоем флюса	1,2–1,4
Дуговая металлизация	0,8–1,2
Газопламенное напыление	0,8–1,2
Плазменное напыление	1,0–1,4
Хромирование электролитическое	0,4–0,9
Железнение электролитическое	0,05–0,50
Контактная наплавка (приварка) металлического слоя	0,85–1,20
Ручная наплавка	0,4–0,6
Эпоксидные композиции	0,3–0,6
Электромеханическая обработка (высадка и сглаживание)	0,8–0,9
Обработка под ремонтный размер	0,08–0,14
Установка дополнительной детали	0,4–1,0
Пластическое деформирование	0,08–0,14

Таблица 2.6 – Коэффициент инфляции по годам [3]

Год	январь 2007	январь 2016	февраль 2016	март 2016	апрель 2016	май 2016	июнь 2016	июль 2016	август 2016	сентябрь 2016
Коэффициент инфляции $K_{инф}$	1,0	1,26	1,29	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,36

2.4 Обоснование способов восстановления детали в целом

На ремонтном предприятии после разборки сборочной единицы при дефектации детали сортируют на несколько групп. При трех сортировочных группах детали делят на годные, негодные и нуждающиеся в ремонте и восстановлении. При большем числе сортировочных групп решают и другие дополнительные задачи.

Результаты контроля сортировки обычно заносят в дефектные ведомости. На основании статистической обработки дефектных ведомостей можно определить *коэффициенты повторяемости дефектов*.

Коэффициент повторяемости i -ого дефекта определяют из выражения

$$K_i = \frac{N_{Di}}{N}, \quad (2.6)$$

где N_{Di} – число деталей с данным дефектом из общего количества продефектованных;

N – общее число продефектованных ремонтпригодных деталей.

Для определения коэффициентов повторяемости дефектов достаточно проанализировать 50–100 деталей данного наименования.

Фактически, коэффициент повторяемости i -ого дефекта показывает вероятность того, что деталь имеет i -й дефект. Например, если из 50-и проверенных валов у 10-и обнаружился износ шпо-

ночной канавки, то коэффициент повторяемости этого дефекта равен $K = 0,2$.

Соответственно, вероятность того, что деталь не имеет i -го дефекта, определяется из выражения

$$\overline{K}_i = 1 - K_i. \quad (2.7)$$

Зная вероятность появления каждого дефекта, можно установить и вероятность различных сочетаний дефектов.

Поскольку появление каждого дефекта рассматривают как независимое событие, в процессе дефектации возможно их появление в различных сочетаниях.

Например, вал имеет три дефекта, при этом коэффициенты повторяемости для каждого дефекта: $K_1 = 0,2$, $K_2 = 0,3$, $K_3 = 0,4$. При трех возможных дефектах число их сочетаний равно восьми (1 – нет дефектов; 2 – только 1-й дефект; 3 – только 2-й дефект; 4 – только 3-й дефект; 5 – 1-й и 2-й дефект; 6 – 1-й и 3-й дефект; 7 – 2-й и 3-й дефект; 8 – все три дефекта). Вероятность появления детали со всеми тремя дефектами:

$$K_{123}^D = K_1 K_2 K_3. \quad (2.8)$$

$$K_{123}^D = 0,2 \cdot 0,3 \cdot 0,4 = 0,024.$$

Вероятность появления детали только с первым дефектом:

$$K_1^D = K_1 \overline{K}_2 \overline{K}_3. \quad (2.9)$$

$$K_1^D = 0,2(1 - 0,3)(1 - 0,4) = 0,084.$$

Вероятность появления детали только со вторым дефектом:

$$K_2^D = \overline{K}_1 K_2 \overline{K}_3. \quad (2.10)$$

$$K_2^D = (1 - 0,2) \cdot 0,3(1 - 0,4) = 0,144.$$

Вероятность появления детали с первым и вторым дефектами:

$$K_{12}^D = K_1 K_2 \overline{K_3}. \quad (2.11)$$

$$K_{12}^D = 0,2 \cdot 0,3(1 - 0,4) = 0,036.$$

Вероятность появления детали без дефектов:

$$K^D = \overline{K_1} \overline{K_2} \overline{K_3}. \quad (2.12)$$

$$K^D = (1 - 0,2)(1 - 0,3)(1 - 0,4) = 0,336.$$

С точки зрения организации производства, чем меньше способов используют для восстановления различных изнашиваемых поверхностей детали, тем меньше требуется видов оборудования, выше его загрузка, а, следовательно, и эффективность производства. Для окончательного выбора способа восстановления изношенных поверхностей детали в целом рассматривают различные сочетания способов, начиная с минимального числа способов, а за основной принимают способ, обеспечивающий оптимальный для наиболее изнашиваемой поверхности детали, то есть поверхности, коэффициент повторяемости дефекта которой максимальный. Если данный способ применим по технологическому критерию ко всем изнашиваемым поверхностям, и обеспечивает коэффициенты долговечности этих поверхностей не ниже 0,8 ($K_D > 0,8$), то себестоимость восстановления детали в целом определяют так, как если бы все поверхности восстанавливали этим способом. Если деталь нельзя восстановить одним способом, используют второй способ, являющийся оптимальным для следующей по изнашиваемости поверхности, и так далее.

Заканчивается анализ определением отношения себестоимости восстановления детали оптимальным для каждой ее изнашиваемой поверхности способом к коэффициенту долговечности детали в целом по выражению

$$K_{\text{ЭД}} = \frac{C_{\text{ВД}}}{K_{\text{ДД}}} = \frac{\sum_1^n K_i C_{\text{В}i}}{K_{\text{ДД}}}, \quad (2.13)$$

где $K_{\text{ЭД}}$ – технико-экономический критерий восстановления детали (устранение всех возможных дефектов);

$C_{\text{ВД}}$ – себестоимость восстановления детали, р;

$K_{\text{ДД}}$ – коэффициент долговечности восстановления детали;

K_i – коэффициент повторяемости i -го дефекта;

$C_{\text{В}i}$ – себестоимость восстановления i -й поверхности восстановленной оптимальным для нее способом, р;

n – число возможных дефектов детали.

Коэффициент долговечности восстановления детали в целом определяют по формуле

$$K_{\text{ДД}} = \frac{\sum_1^n K_i K_{\text{Д}i}}{\sum_1^n K_i}, \quad (2.14)$$

где $K_{\text{Д}i}$ – коэффициент долговечности i -й поверхности, восстановленной j -м способом.

Контрольные вопросы

1. Критерии выбора рационального способа восстановления.
2. Условия выбора способа восстановления по технологическому критерию.
3. Выбор способа восстановления по техническому критерию, его особенности.
4. Условия выбора способа восстановления по техническому критерию.
5. Восстановление изношенной поверхности наплавкой.
6. Условия выбора способа восстановления по технико-экономическому критерию.
7. Обоснование выбора способов восстановления детали.

3 ПРИМЕРЫ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Пример 1 – Выбор оптимального способа для поверхности тела вращения.

Условие задачи

При ремонте трактора МТЗ установлены износы гильзы гидроувеличителя сцепного веса (ГСВ) (изношенные поверхности выделены на рисунке 3.1).

Выбрать рациональный способ восстановления поверхности 1 гильзы гидроувеличителя сцепного веса трактора МТЗ.

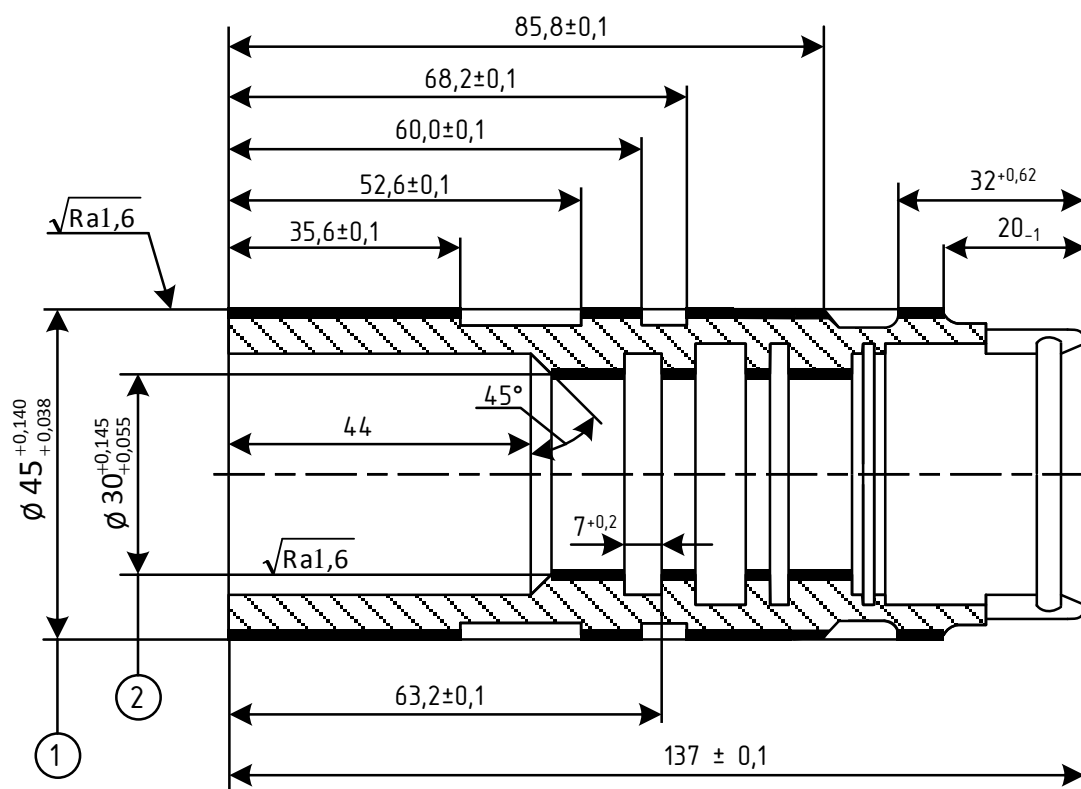


Рисунок 3.1 – Гильза гидроувеличителя сцепного веса трактора МТЗ

Исходные данные

Материал: сталь 15Х

Количество на машину: 1.

Таблица 3.1 – Описание дефектов ГСВ

Номер дефекта	Наименование дефекта
1	Износ наружной поверхности до диаметра 44,9 мм
2	Износ внутренней поверхности до диаметра 30,4 мм

Решение

Выбор рациональных способов восстановления

Производим выбор рационального способа заданной изношенной поверхности гильзы гидроувеличителя, используя три основных критерия:

а) технологический – характеризующий принципиальную возможность применения нескольких способов для восстановления поверхности деталей;

б) технический – оценивающий свойства восстановленной поверхности детали.

Оценочным показателем при этом является значение коэффициента долговечности (K_D), который определяется:

$$K_D = K_I K_B K_C K_P, \quad (3.1)$$

где K_I , K_B , K_C , K_P – коэффициенты износостойкости, выносливости, сцепляемости и работоспособности восстановленной детали в условиях эксплуатации (нормативные коэффициенты, принимаемые по справочным данным).

Коэффициент долговечности пропорционален сроку службы детали в эксплуатации и, значит, рациональным будет способ, у которого $K_D \rightarrow \max$;

в) технико-экономический критерий – связывает стоимость восстановления деталей и ее долговечность и оценивается по формуле:

$$K_{\text{Э}} = \frac{C_B}{K_D}, \quad (3.2)$$

где $K_{\text{Э}}$ – коэффициент технико-экономической эффективности;
 C_B – стоимость восстановления изношенной поверхности детали.

Эффективным по этому критерию считается способ, у которого $K_{\text{Э}} \rightarrow \min$.

Оценка способа по различным критериям

Выбор способа по технологическому критерию

Учитывая конструкцию и свойства детали – конфигурацию, материал, твердость, степень износа и размеры, согласно рекомендациям (таблица 2.1) выбрать несколько способов восстановления. Для рассматриваемого случая наиболее приемлемыми способами восстановления поверхности 1 гильзы гидроувеличителя можно считать следующие способы:

а) наплавку поверхности в среде углекислого газа: материал – сталь, поверхность – наружная цилиндрическая, наружный диаметр поверхности больше 15 мм, толщина наносимого покрытия 0,5–3,5 мм;

б) вибродуговую наплавку: материал – сталь, поверхность – наружная цилиндрическая, наружный диаметр поверхности больше 15 мм, толщина наносимого покрытия 0,5–3,0 мм;

в) железнение: материал – сталь, поверхность – наружная цилиндрическая, наружный диаметр поверхности больше 12 мм, толщина наносимого покрытия 0,1–1,5 мм.

Оценка выбранных способов восстановления детали по техническому критерию (K_D)

Выбранные по технологическому критерию способы восстановления детали оцениваем по техническому критерию.

Значения коэффициентов для выбранных способов принимаем из таблицы 2.2.

При наплавке поверхности в среде углекислого газа:

$$K_{И1} = 0,95, K_{В1} = 0,95, K_{С1} = 1,0, K_{Р1} = 0,82.$$

При вибродуговой наплавке:

$$K_{И2} = 0,95, K_{В2} = 0,62, K_{С2} = 1,0, K_{Р2} = 0,82.$$

При железнении:

$$K_{И3} = 1,1, K_{В3} = 0,8, K_{С3} = 0,7, K_{Р3} = 0,8.$$

С учетом этого:

а) при наплавке поверхности в среде углекислого газа

$$K_{Д1} = K_{И1}K_{В1}K_{С1}K_{Р1},$$

$$K_{Д1} = 0,95 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 0,82 = 0,740;$$

б) при вибродуговой наплавке

$$K_{Д2} = K_{И2}K_{В2}K_{С2}K_{Р2},$$

$$K_{Д2} = 0,95 \cdot 0,62 \cdot 1,0 \cdot 0,82 = 0,483;$$

в) при железнении

$$K_{Д3} = K_{И3}K_{В3}K_{С3}K_{Р3},$$

$$K_{Д3} = 1,1 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 0,493.$$

Отсюда следует, что рациональным способом восстановления поверхности гильзы гидроувеличителя по техническому критерию будет наплавка изношенной поверхности в среде углекислого газа, где $K_{Д1} = 0,740$ имеет максимальное значение из выбранных способов.

Определение стоимости восстановления изношенной поверхности гильзы

В связи с отсутствием справочных данных, определяем стоимость восстановления поверхности гильзы гидроувеличителя для каждого выбранного способа, используя формулу:

$$C_B = C_Y S K_{ИНФ}, \quad (3.3)$$

где C_Y – удельная себестоимость восстановления единицы площади изношенной поверхности, р/см² (таблица 2.5);

S – площадь восстанавливаемой поверхности, см².

$K_{ИНФ}$ – коэффициент инфляции, учитывающий изменение удельной себестоимости восстановления поверхности в связи с инфляцией (таблица 2.6). Для сентября 2016 г. принимаем $K_{ИНФ} = 1,36$.

Площадь поверхности 1 равна сумме площадей боковых поверхностей четырех цилиндров диаметром $D = 45$ мм при длине:

$$l_1 = 35,6 \text{ мм};$$

$$l_2 = 60 - 52,6 = 7,4 \text{ мм};$$

$$l_3 = 85,8 - 68,2 = 17,6 \text{ мм};$$

$$l_4 = 32 - 20 = 12 \text{ мм}.$$

Площадь боковой поверхности цилиндра определяем по формуле:

$$S = \pi D l, \quad (3.4)$$

Тогда площадь всех изношенных частей поверхности 1 будет равна:

$$S = \pi D l_1 + \pi D l_2 + \pi D l_3 + \pi D l_4 = \pi D (l_1 + l_2 + l_3 + l_4), \quad (3.5)$$

Переведя значение диаметров и длин изношенных поверхностей гильзы из миллиметров в сантиметры и записав их в формулу (3.5), получим:

$$S = 3,14 \cdot 4,5 (3,56 + 0,74 + 1,76 + 1,2) = 102,58 \text{ см}^2.$$

Подставив в формулу (3.3) найденные значения площади поверхности S , и принимая во внимание $K_{ИНФ}$, получим себестоимость восстановления поверхности гильзы гидроувеличителя выбранными способами:

а) наплавка поверхности в среде углекислого газа, при $C_{y1} = 0,7 \text{ р/см}^2$ (таблица 2.5):

$$C_{B1} = C_{y1} S_1 K_{ИНФ},$$

$$C_{B1} = 0,7 \cdot 102,58 \cdot 1,36 = 97,65 \text{ р};$$

б) вибродуговая наплавка, при $C_{y2} = 0,9 \text{ р/см}^2$ (таблица 2.5):

$$C_{B2} = C_{y2} S K_{ИНФ},$$

$$C_{B2} = 0,9 \cdot 102,58 \cdot 1,36 = 125,56 \text{ р};$$

в) железнение, при $C_{y3} = 0,275 \text{ р/см}^2$ (таблица 2.5):

$$C_{B3} = C_{y3} S K_{ИНФ}.$$

$$C_{B3} = 0,275 \cdot 102,58 \cdot 1,36 = 38,36 \text{ р}.$$

Сравнивая найденные значения, устанавливаем, что по себестоимости восстановления поверхности гильзы самым экономичным является способ, затраты по которому минимальны, то есть где $C_{B3} = 38,4 \text{ р}$. Это способ железнения.

Выбор рационального способа восстановления по технико-экономическому критерию

Оценку способов восстановления поверхности гильзы гидроувеличителя оцениваем не только техническому, но и по технико-экономическому критерию, для чего проводим расчет, используя формулу (2.2).

В этом случае будем иметь:

а) для наплавки поверхности в среде углекислого газа

$$K_{Э1} = \frac{C_{B1}}{K_{Д1}},$$

$$K_{\text{Э1}} = \frac{144,33}{0,740} = 195,04 \text{ р.};$$

б) для вибродуговой наплавки

$$K_{\text{Э2}} = \frac{C_{B2}}{K_{D2}},$$

$$K_{\text{Э2}} = \frac{185,57}{0,483} = 384,20 \text{ р.};$$

в) при железнении

$$K_{\text{Э3}} = \frac{C_{B3}}{K_{D3}},$$

$$K_{\text{Э3}} = \frac{56,7}{0,493} = 115,01 \text{ р.}$$

Как видно из найденных значений, рациональным способом восстановления поверхности гильзы гидроувеличителя по технико-экономическому критерию является способ железнения, так как значение $K_{\text{Э3}} = 115,01$ р. Среди анализируемых способов этот наиболее экономичный, так как критерий имеет наименьшее значение.

Окончательный выбор рационального способа восстановления гильзы по найденным значениям критериев

Анализируя выбранные способы по всем трем критериям, отмечаем, что рациональным способом восстановления гильзы гидроувеличителя по техническому критерию будет наплавка поверхности в среде углекислого газа, где $K_{D1} = 0,740$, то есть имеет максимальное значение, а рациональным способом восстановления поверхности гильзы по технико-экономическому критерию явля-

ется способ железнения, так как значение $K_{ЭЗ} = 115,01$ р, то есть имеет наименьшую величину среди изучаемых способов.

Окончательный выбор делаем в пользу технико-экономического критерия, то есть в качестве рационального способа восстановления считаем железнение, позволяющего с минимальными затратами восстановить изношенную поверхность гильзы ГСВ.

В дальнейшем разрабатывается технологический процесс железнения поверхности гильзы гидроувеличителя, определенным выполненным выбором рационального способа.

Пример 2 – Выбор оптимального способа для плоской поверхности.

Условие задачи

При ремонте двигателя установлены износы кулачковой муфты привода гидронасоса (изношенные поверхности выделены на рисунке 3.2).

Выбрать рациональный способ восстановления поверхностей 1 кулачковой муфты привода гидронасоса двигателя СМД.

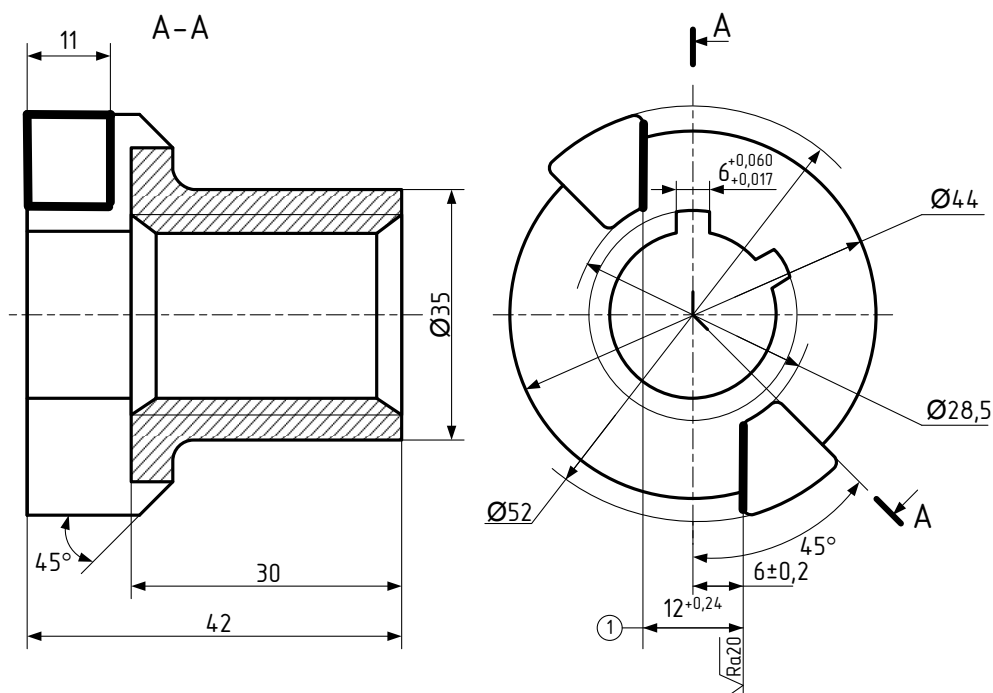


Рисунок 3.2 – Кулачковая муфта привода гидронасоса двигателя СМД

Исходные данные

Материал: сталь 40

Количество на машину: 1.

Таблица 3.2 – Описание дефектов

Номер дефекта	Наименование дефекта
1	Износ рабочих поверхностей кулачков до размера 13,3 мм.

Решение

Выбор рациональных способов восстановления

Производим выбор рационального способа заданной изношенной поверхности кулачковой муфты привода гидронасоса двигателя, используя три основных критерия:

а) технологический – характеризующий принципиальную возможность применения нескольких способов для восстановления поверхности деталей;

б) технический – оценивающий свойства восстановленной поверхности детали.

Оценочным показателем при этом является значение коэффициента долговечности (K_D), который определяется по формуле (3.1):

$$K_D = K_I K_B K_C K_P,$$

где K_I , K_B , K_C , K_P – коэффициенты износостойкости, выносливости, сцепляемости и работоспособности восстановленной детали в условиях эксплуатации (нормативные коэффициенты, принимаемые по справочным данным).

Коэффициент долговечности пропорционален сроку службы детали в эксплуатации и, значит, рациональным будет способ, у которого $K_D \rightarrow \max$;

в) технико-экономический критерий – связывает стоимость восстановления деталей и ее долговечность и оценивается по формуле (3.2):

$$K_{\text{Э}} = \frac{C_B}{K_D},$$

где $K_{\text{Э}}$ – коэффициент технико-экономической эффективности;
 C_B – стоимость восстановления изношенной поверхности детали.

Эффективным по этому критерию считается способ, у которого $K_{\text{Э}} \rightarrow \min$.

Оценка способа по различным критериям

Выбор способа по технологическому критерию

Учитывая свойства детали – конфигурацию, материал, твердость, степень износа и размеры, согласно рекомендациям (таблица 2.1) выбираем несколько способов восстановления. Для рассматриваемого случая наиболее приемлемыми способами восстановления поверхности 1 кулачковой муфты привода гидронасоса двигателя можно считать следующие способы:

а) наплавка поверхности ручной электродуговой сваркой: материал – сталь, поверхность – плоская, наружный размер поверхности больше 10 мм, толщина наносимого покрытия 1–6 мм;

б) газопламенное напыление: материал – сталь, поверхность – плоская, минимальный наружный диаметр поверхности больше 30 мм, толщина наносимого покрытия 0,3–3 мм;

в) железнение: материал – сталь, поверхность – плоская, минимальный наружный диаметр поверхности больше 12 мм, толщина наносимого покрытия 0,1–1,5 мм.

Оценка выбранных способов восстановления детали по техническому критерию (K_D)

Выбранные по технологическому критерию способы восстановления детали оцениваем по техническому критерию.

Значения коэффициентов для выбранных способов принимаем из таблицы 2.2.

При наплавке поверхности ручной электродуговой сваркой:

$$K_{И1} = 1,00, K_{В1} = 0,80, K_{С1} = 1,00, K_{Р1} = 0,80.$$

При газопламенном напылении:

$$K_{И2} = 1,15, K_{В2} = 0,80, K_{С2} = 0,70, K_{Р2} = 0,80.$$

При железнении:

$$K_{И3} = 1,10, K_{В3} = 0,80, K_{С3} = 0,70, K_{Р3} = 0,80.$$

С учетом этого:

а) при наплавке поверхности ручной электродуговой сваркой

$$K_{Д1} = K_{И1}K_{В1}K_{С1}K_{Р1},$$

$$K_{Д1} = 1,0 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 0,640;$$

б) при газопламенном напылении

$$K_{Д2} = K_{И2}K_{В2}K_{С2}K_{Р2},$$

$$K_{Д2} = 1,15 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 0,515;$$

в) при железнении

$$K_{Д3} = K_{И3}K_{В3}K_{С3}K_{Р3},$$

$$K_{Д3} = 1,1 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 0,493.$$

Из расчетов следует, что рациональным способом восстановления поверхности кулачковой муфты привода гидронасоса двигателя по техническому критерию будет наплавка изношенной поверхности ручной электродуговой сваркой, где $K_{Д1} = 0,640$ имеет максимальное значение из выбранных способов.

Определение стоимости восстановления изношенной поверхности гильзы

В связи с отсутствием справочных данных, определяем стоимость восстановления поверхности кулачковой муфты привода гидронасоса двигателя для каждого выбранного способа, используя формулу (3.3):

$$C_B = C_Y S K_{ИНФ},$$

где C_Y – удельная себестоимость восстановления единицы площади изношенной поверхности, р/см² (таблица 2.5);

S – площадь восстанавливаемой поверхности, см².

$K_{ИНФ}$ – коэффициент инфляции, учитывающий изменение удельной себестоимости восстановления поверхности в связи с инфляцией (таблица 2.6). Для сентября 2016 г. принимаем $K_{ИНФ} = 1,36$.

Площадь поверхности 1 равна сумме площадей двух прямоугольников со сторонами $l = 11$ мм и $h = 0,5(D_1 - D_2)$, где

$$D_1 = 52 \text{ мм};$$

$$D_2 = 28,5 \text{ мм};$$

Тогда площадь всех изношенных поверхностей детали будет равна:

$$S = 2 \cdot 0,5 l (D_1 - D_2). \quad (3.6)$$

Переведя значение диаметров и длин изношенных поверхностей муфты из миллиметров в сантиметры и записав их в формулу (3.6), получим:

$$S = 2 \cdot 0,5 \cdot 1,1 (5,2 - 2,85) = 2,59 \text{ см}^2.$$

Подставив в формулу (3.3) найденные значения площади поверхности S , и принимая во внимание $K_{ИНФ}$, получим себестоимость восстановления поверхности кулачковой муфты привода гидронасоса двигателя выбранными способами:

а) наплавка поверхности ручной электродуговой сваркой, при $C_{y1} = 0,5 \text{ р/см}^2$ (таблица 2.5):

$$C_{B1} = C_{y1} S_1 K_{ИНФ},$$

$$C_{B1} = 0,5 \cdot 2,59 \cdot 1,36 = 1,76 \text{ р};$$

б) газопламенное напыление, при $C_{y2} = 1,0 \text{ р/см}^2$ (таблица 2.5):

$$C_{B2} = C_{y2} S K_{ИНФ},$$

$$C_{B2} = 1,0 \cdot 2,59 \cdot 1,36 = 3,522 \text{ р};$$

в) железнение, при $C_{y3} = 0,275 \text{ р/см}^2$ (таблица 2.5):

$$C_{B3} = C_{y3} S K_{ИНФ}.$$

$$C_{B3} = 0,275 \cdot 2,59 \cdot 1,36 = 0,969 \text{ р}.$$

Сравнивая найденные значения, устанавливаем, что по себестоимости восстановления поверхности кулачковой муфты привода гидронасоса двигателя самым экономичным является способ, затраты по которому минимальны, то есть где $C_{B3} = 0,969 \text{ р}$. Это способ железнения.

Выбор рационального способа восстановления по технико-экономическому критерию

Оценку способов восстановления поверхности кулачковой муфты привода гидронасоса двигателя по технико-экономическому критерию проводим, используя формулу (2.2).

Для рассматриваемого случая будем иметь:

а) для наплавки поверхностей ручной электродуговой сваркой

$$K_{Э1} = \frac{C_{B1}}{K_{Д1}}.$$

$$K_{\text{Э1}} = \frac{1,76}{0,640} = 2,750 \text{ р};$$

б) для газопламенного напыления

$$K_{\text{Э2}} = \frac{C_{B2}}{K_{D2}};$$

$$K_{\text{Э2}} = \frac{3,522}{0,515} = 6,839 \text{ р};$$

в) при железнении

$$K_{\text{Э3}} = \frac{C_{B3}}{K_{D3}};$$

$$K_{\text{Э3}} = \frac{0,969}{0,493} = 1,966 \text{ р}.$$

Как видно из найденных значений, рациональным способом восстановления изношенных поверхностей 1 кулачковой муфты привода гидронасоса двигателя по технико-экономическому критерию будет способ железнения, так как значение $K_{\text{Э3}} = 1,966$ р. Среди анализируемых способов этот критерий имеет наименьшее значение.

Окончательный выбор рационального способа восстановления муфты по полученным значениям критериев

Анализируя выбранные способы по всем трем критериям, отмечаем, что любой из них можно использовать при восстановлении изношенной поверхности муфты, однако рациональным способом восстановления по техническому критерию будет наплавка поверхности ручной электродуговой сваркой, где коэффициент долговечности $K_{D1} = 0,640$, то есть имеет максимальное значение, а при

использовании же технико-экономического критерия рациональным способом восстановления поверхности гильзы является способ железнения, так как значение $K_{ЭЗ} = 1,966$ р, то есть среди изучаемых способов он имеет наименьшую величину.

Окончательный выбор делаем в пользу технико-экономического критерия, то есть в качестве рационального способа восстановления считаем железнение, позволяющего с минимальными затратами восстановить изношенную поверхность кулачковой муфты привода гидронасоса двигателя.

Пример 3 – Выбор оптимального способа для нескольких поверхностей.

Условие задачи

При дефектации установлены износы оси опорного катка трактора (изношенные поверхности выделены на рисунке 3.3). Коэффициенты повторяемости для дефектов: $K_1 = 0,2$, $K_2 = 0,3$, $K_3 = 0,4$.

Выбрать рациональный способ восстановления поверхностей 1 оси опорного катка трактора.

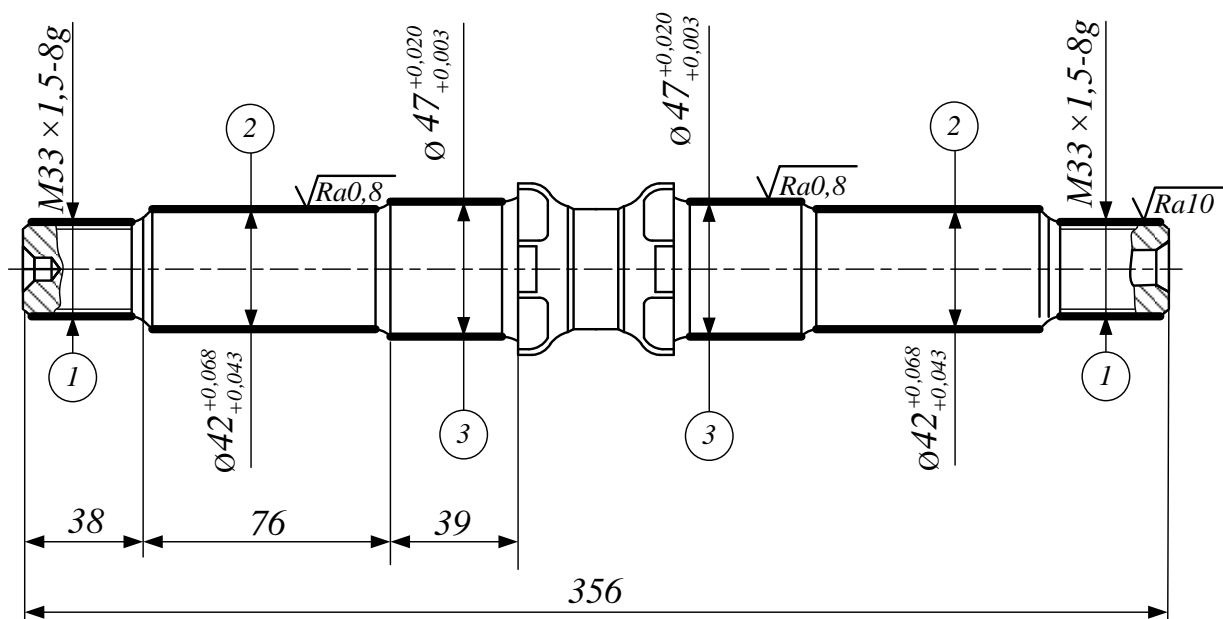


Рисунок 3.2 – Ось опорного катка трактора

Исходные данные

Материал: сталь 30ХГТ
Количество на машину: 8.

Таблица 3.2 – Описание дефектов

Номер дефекта	Наименование дефекта
1	Износ поверхности резьбы.
2	Износ поверхностей под каток до диаметра 41,97 мм.
3	Износ поверхностей под подшипники до диаметра 46,92 мм.

Решение

Выбор рациональных способов восстановления

Производим выбор рационального способа изношенных поверхностей оси, используя три основных критерия.

По технологическому критерию (таблица 2.1):

– для дефекта 1: наплавка в среде CO_2 , вибродуговая наплавка, плазменная наплавка;

– для дефекта 2: электроконтактная приварка металлического слоя (ленты), наплавка в среде CO_2 , железнение;

– для дефекта 3: электроконтактная приварка металлического слоя (ленты), наплавка в среде CO_2 , вибродуговая наплавка.

Требуется определить оптимальные методы восстановления для каждой изнашиваемой поверхности.

С этой целью по каждому дефекту определяем способы восстановления по критерию применимости, обеспечивающие коэффициенты долговечности восстанавливаемой поверхности не менее 0,8 (аналогично примерам 1 и 2).

Затем определяем себестоимость восстановления каждой изнашиваемой поверхности детали для тех методов восстановления, которые обеспечивают коэффициент долговечности восстанавливаемой поверхности не менее 0,8 (аналогично примерам 1 и 2). Далее вычисляем технико-экономический показатель каждого метода восстановления. Полученные результаты сводим в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Техничко-экономическая характеристика способов восстановления поверхностей оси опорного катка

№ дефекта	Коэффициент повторяемости дефекта K_p	Возможные способы восстановления	Коэффициенты, определяющие долговечность работы восстановленных деталей				Коэффициент долговечности $K_{дл}$	Удельная себестоимость восстановления $C_{у, р/см^2}$	Площадь восстанавливаемой поверхности $S, см^2$	Себестоимость восстановления $C_{в, р/см^2}$	Техничко-экономический показатель, P
			$K_{дл}$	$K_{в}$	$K_{с}$	$K_{р}$					
1	0,2	Наплавка в среде CO_2	0,95	0,95	1,00	0,82	0,740	0,7	78,7	74,9	101,2
		Плазменная наплавка	1,25	0,85	0,75	0,80	0,638	1,2		128,4	201,3
		Вибродуговая наплавка	0,95	0,62	1,00	0,82	0,483	0,9		96,3	199,4
2	0,3	Наплавка в среде CO_2	0,95	0,95	1,00	0,82	0,740	0,7	200,5	190,9	258,0
		Электроконтактная приварка металлического слоя (ленты)	1,00	0,80	0,85	0,80	0,544	1,1		299,9	551,3
		Железнение	1,10	0,80	0,70	0,80	0,493	0,3		81,8	165,9
3	0,4	Наплавка в среде CO_2	0,95	0,95	1,00	0,82	0,740	0,7	115,1	109,6	148,1
		Электроконтактная приварка металлического слоя (ленты)	1,00	0,80	0,85	0,80	0,544	1,1		172,2	316,5
		Вибродуговая наплавка	0,95	0,62	1,00	0,82	0,483	0,9		140,9	291,7

Примечание – коэффициент инфляции для сентября 2016 г. принимаем $K_{инф} = 1,36$.

Определяем оптимальный способ восстановления изнашиваемых поверхностей: для дефекта 1 – наплавка в среде CO_2 ; для дефекта 2 – железнение; для дефекта 3 – наплавка в среде CO_2 .

Для окончательного выбора способа восстановления изношенных поверхностей детали в целом необходимо рассмотреть различные сочетания способов, принимая за основной способ, оптимальный для наиболее изнашиваемой поверхности, то есть поверхности, коэффициент повторяемости дефекта которой максимальный.

В данной задаче рассмотрим применение трех вариантов сочетаний способов восстановления оси опорного катка в целом:

1 вариант – устранение всех трех дефектов наплавкой в среде углекислого газа.

2 вариант – устранение 1-го и 3-го дефектов вибродуговой наплавкой, а дефекта 2 – наплавкой в среде углекислого газа.

3 вариант – устранение каждого дефекта оптимальным для него способом: дефект 1 – наплавка в среде углекислого газа; дефект 2 – железнение; дефект 3 – наплавка в среде углекислого газа.

Определения коэффициентов долговечности восстановленной детали по техническому критерию

Вычислим коэффициенты долговечности восстановленной детали по каждому варианту сочетания способов по формуле (2.14), при этом в формулах для каждого варианта восстановления значения коэффициента повторяемости дефекта K_i и коэффициента долговечности K_{Di} принимаем из соответствующей строки таблицы 3.3.

Для 1-го варианта

$$K_{дд1} = \frac{K_1 K_{д1} + K_2 K_{д4} + K_3 K_{д7}}{K_1 + K_2 + K_3},$$

$$K_{дд1} = \frac{0,2 \cdot 0,74 + 0,3 \cdot 0,74 + 0,4 \cdot 0,74}{0,2 + 0,3 + 0,4} = 0,74.$$

Для 2-го варианта

$$K_{\text{дд}2} = \frac{K_1 K_{\text{д}3} + K_2 K_{\text{д}4} + K_3 K_{\text{д}9}}{K_1 + K_2 + K_3},$$

$$K_{\text{дд}2} = \frac{0,2 \cdot 0,483 + 0,3 \cdot 0,74 + 0,4 \cdot 0,483}{0,2 + 0,3 + 0,4} = 0,57.$$

Для 3-го варианта

$$K_{\text{дд}3} = \frac{K_1 K_{\text{д}1} + K_2 K_{\text{д}6} + K_3 K_{\text{д}7}}{K_1 + K_2 + K_3},$$

$$K_{\text{дд}3} = \frac{0,2 \cdot 0,74 + 0,3 \cdot 0,493 + 0,4 \cdot 0,74}{0,2 + 0,3 + 0,4} = 0,66.$$

Выбор рационального способа восстановления детали в целом по технико-экономическому критерию

Определим технико-экономический критерий для каждого варианта сочетания способов восстановления по формуле (2.13), при этом в формулах для каждого из них значения коэффициента повторяемости дефекта K_i и себестоимость восстановления поверхности C_{B_i} принимаем из соответствующей строки таблицы 3.3.

Для 1-го варианта

$$K_{\text{эд}1} = \frac{K_1 C_{B1} + K_2 C_{B4} + K_3 C_{B7}}{K_{\text{дд}1}},$$

$$K_{\text{эд}1} = \frac{0,2 \cdot 74,9 + 0,3 \cdot 190,9 + 0,4 \cdot 109,6}{0,74} = 156,9 \text{ р.}$$

Для 2-го варианта

$$K_{\text{эд}2} = \frac{K_1 C_{B3} + K_2 C_{B4} + K_3 C_{B9}}{K_{\text{дд}2}},$$

$$K_{\text{эд}2} = \frac{0,2 \cdot 96,3 + 0,3 \cdot 190,9 + 0,4 \cdot 140,9}{0,57} = 233,1 \text{ р.}$$

Для 3-го варианта

$$K_{\text{эд}3} = \frac{K_1 C_{B1} + K_2 C_{B6} + K_3 C_{B7}}{K_{\text{д}3}},$$

$$K_{\text{эд}3} = \frac{0,2 \cdot 74,9 + 0,3 \cdot 81,8 + 0,4 \cdot 109,6}{0,66} = 126,3 \text{ р.}$$

Как видно из расчетов, наиболее целесообразен третий вариант – восстановление каждой изнашиваемой поверхности оптимальным для него способом: дефект 1 – наплавка в среде углекислого газа; дефект 2 – железнение; дефект 3 – наплавка в среде углекислого газа.

Контрольные вопросы

1. Определение площади восстанавливаемой поверхности для поверхности тела вращения.
2. Определение площади восстанавливаемой поверхности для плоской поверхности.
3. Оценка выбранных способов восстановления детали по коэффициенту долговечности.
4. Выбор рационального способа восстановления детали в целом.
5. Выбор рационального способа восстановления для нескольких поверхностей на одной детали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии подробно проанализированы причины возникновения износов на основе принятых теорий изнашивания, рассмотрены способы уменьшения интенсивности изнашивания в соединениях. В зависимости от величины изнашивания, материала детали и ее термообработки предложен выбор рационального способа восстановления изношенной поверхности в зависимости от технологических возможностей производства, условий эксплуатации, себестоимости восстановления, зависимости стоимости восстановления от долговечности работы соединения. Оценка этих факторов проводится по технологическому, техническому и технико-экономическому критериям, окончательное же решение принимается на конкретном производстве с учетом его технических и финансовых возможностей. Для разъяснения отдельных вопросов, возникающих при расчете, приведены примеры определения выбора оптимального способа восстановления для различных типов изношенных поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность и ремонт машин [Текст] : учебник / В. В. Курчаткин [и др.]. – М. : Колос, 2000. – 776 с.
2. Технология ремонта машин [Текст] : учебник / Е. А. Пучин [и др.]. – М. : КолосС, 2007. – 488 с.
3. Савин, И. Г. Выбор рационального способа восстановления детали [Текст] : метод. указания / И. Г. Савин, Ю. Д. Янчин. – Краснодар : КубГАУ, 2011. – 17 с.
4. Уровень инфляции в Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://уровень инфляции.рф>.
5. Технология ремонта машин [Текст] : учеб. пособие / под ред. И. Г. Савина. – Краснодар : КубГАУ, 2013. – 499 с.
6. Технический сервис машин и основы проектирования предприятий [Текст] : учебник / М. И. Юдин [и др.]. – Краснодар : Совет. Кубань, 2007. – 968 с.
7. Селиванов, А. И. Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники [Текст] : учебник / А. И. Селиванов, Ю. Н. Артемьев. – М. : КолосС, 2009. – 167 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1 Износы и изнашивание поверхностей деталей машин.....	4
1.1 Причины снижения работоспособности машин в процессе эксплуатации.....	4
1.2 Теории трения и изнашивания.....	7
1.3 Виды и основные закономерности изнашивания.....	11
1.4 Способы уменьшения интенсивности изнашивания в соединениях.....	32
2 Выбор способа восстановления изношенной поверхности детали.....	35
2.1 Выбор способа по технологическому критерию.....	36
2.2 Выбор способа по техническому критерию.....	38
2.3 Выбор способа по технико-экономическому критерию....	62
2.4 Обоснование способов восстановления детали в целом ...	64
3 Пример выбора рационального способа восстановления изношенной поверхности детали.....	68
Заключение.....	88
Список литературы.....	89

Учебное издание

Чеботарёв Михаил Иванович
Кадыров Михаил Реминович

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА
ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Подписано в печать 14.11.2016. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.

Усл. печ. л. – 5,1. Уч.-изд. л. – 4,0.

Тираж 70 экз. Заказ №

Типография Кубанского государственного аграрного университета.
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13