

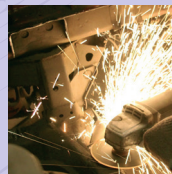
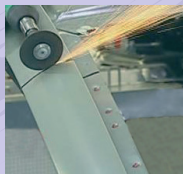
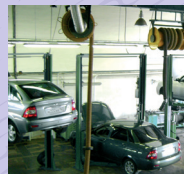
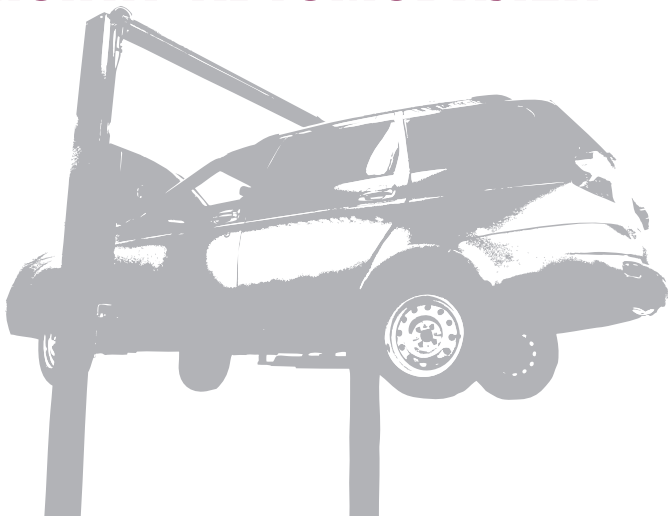
Г.В. Мураткин  
В.С. Малкин  
В.Г. Доронкин



# ОСНОВЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И РЕМОНТ АВТОМОБИЛЕЙ

Часть 1

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт машиностроения  
Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

Г.В. Мураткин, В.С. Малкин, В.Г. Доронкин

## **ОСНОВЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И РЕМОНТ АВТОМОБИЛЕЙ**

Учебное пособие

В двух частях

Часть 1

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ**

Тольятти  
Издательство ТГУ  
2012

УДК 629.33.004.57 (075.8)

ББК 39.33-08я73

М91

Рецензенты:

к.т.н., доцент, завкафедрой «Автомобили» Ульяновского государственного технического университета *М.Ю. Обшивалкин*;  
д.т.н., профессор Тольяттинского государственного университета  
*В.В. Ельцов*.

Под редакцией *Г.В. Мураткина*.

**М91** Мураткин, Г.В. Основы восстановления деталей и ремонт автомобилей. В 2 ч. Ч. 1. Технологические методы восстановления деталей и ремонта автомобилей : учебное пособие / Г.В. Мураткин, В.С. Малкин, В.Г. Доронкин ; под ред. Г.В. Мураткина. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. — 247 с. : пер.

В первой части учебного пособия рассмотрены виды изнашивания деталей машин, технологические основы и способы их восстановления. Приведены необходимые сведения о причинах и характере разрушения материала деталей в процессе эксплуатации. Показаны основные пути снижения интенсивности изнашивания деталей и узлов автомобилей. Представлены взаимосвязи эксплуатационных свойств детали с параметрами её поверхностного слоя, даны рекомендации по проектированию технологических процессов с их учетом.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 190600 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

УДК 629.33.004.57 (075.8)

ББК 39.33-08я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

ISBN 978-5-8259-0682-9

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Существующая в настоящее время тенденция уменьшения веса и металлоемкости машин наряду с ужесточением условий эксплуатации приводит к их интенсивному изнашиванию. В результате машина теряет свои служебные свойства: снижаются мощность двигателя, производительность, транспортная скорость, повышается удельный расход горючих и смазочных материалов, нарушается кинематическая точность механизмов, изменяется характер действующих нагрузок, появляются вибрации и шумы. Изнашивание деталей, как правило, происходит на поверхности и обусловлено процессами отделения частиц материала, развития микротрещин, окисления, разупрочнения, выгорания легирующих элементов, перераспределения остаточных напряжений. Именно эти процессы являются причиной 80...85% отказов и выходов из строя механизмов и машин. Изнашивание рабочих поверхностей деталей помимо изменения их размеров и формы сопровождается снижением эксплуатационных свойств.

Материал поверхностного слоя детали по своему строению и физико-механическим свойствам резко отличается от основного материала. Его удаление в процессе изнашивания изделий неизбежно приводит к изменению физического состояния детали, которое выражается в снижении твердости материала, уровня остаточных напряжений, нарушении цельности поверхности и др. В результате изношенная деталь в большинстве случаев обладает пониженными эксплуатационными свойствами.

Ремонт с давних пор считался одним из основных способов возвращения технических средств к выполнению заданных им функций. Под ремонтом понимается совокупность организационно-технических и технологических мероприятий, направленных на устранение неисправностей и отказов с целью восстановления работоспособности и ресурса узлов, агрегатов и машины в целом в соответствии с требованиями технической документации. И в настоящее время ремонт широко применяется для продления жизненного цикла машин. Кроме того, у ремонта появились новые задачи: доработка и (полная или частичная) модернизация недостаточно эффективных изделий.

При проведении ремонта машин, в том числе автомобилей, существуют два основных направления восстановления их работоспособности: замена изношенной детали на новую и замена изношенной детали на восстановленную. Первый путь является экстенсивным

и наиболее дорогостоящим. Второй считается ресурсосберегающим и экологически чистым, но требует дополнительных материальных и трудовых затрат, связанных с процессом восстановления.

Как показывает многолетняя мировая практика, у автомобилей, поступающих в капитальный ремонт, только 20% деталей подлежат выбраковке и утилизации, 20% – пригодны для дальнейшей работы без восстановления, а 60% – можно восстановить. Однако еще в советские времена у многих производителей и работников сферы государственного управления нашей страны сложилось устойчивое мнение о неэффективности капитального ремонта автомобилей. Они ратовали за безремонтный принцип использования автомобиля, который предполагает после одного регламентного пробега отправлять машину в утиль, а все разговоры о необходимости капитального ремонта называли «колхозными замашками». Такое мнение основывалось на том, что, действительно, в большинстве случаев качество и долговечность восстановленных при капитальном ремонте узлов и агрегатов автомобиля намного ниже качества новых изделий, а стоимость ремонтных работ достаточно большая. Происходило это из-за низкого уровня ремонтных технологий и оборудования, недостаточной культуры производства и нарушений технологической дисциплины. При этом противниками капитального ремонта приводился еще один довод: в развитых капиталистических странах реновация (от лат. *renovatio* – обновление, возобновление) автомобилей не проводится. Однако это не так. За рубежом вопросами обеспечения рационального сервиса фирмы-изготовители начинают заниматься уже в период создания новой техники, причем размер затрат на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт является одним из основных показателей ее будущей конкурентоспособности. А восстановление дорогостоящих изделий считается весьма выгодным делом. Судите сами: на специализированном ремонтном предприятии «Интернейшнел Харвестер» в г. Чикаго (США) стоимость восстановления узлов и агрегатов грузовых автомобилей и тракторов составляет 20...25% от стоимости изготовления новых изделий. Отпускная цена восстановленных узлов и агрегатов в среднем на 20% меньше цены новых. При этом производитель гарантирует ресурс восстановленных деталей не менее ресурса новых изделий. Это стало возможным благодаря высокому уровню культуры производства и внедрению на ремонтном предприятии поточной линии. Опыт этой фирмы получает все большее распространение в промышленно развитых странах, так как

реновация сельскохозяйственной, дорожно-строительной техники и автомобилей приносит значительную прибыль. В настоящее время в реновационных отраслях развитых стран мира задействовано около 30% технологического оборудования и рабочей силы.

Реновация узлов, агрегатов и машин с учетом выбраковки деталей и технологических отходов наряду с экономией материальных, энергетических, трудовых и природных ресурсов многократно снижает загрязнение окружающей среды. По сути, это самое экологически чистое и энергосберегающее производство, не требующее значительных инвестиций, которому на сегодня нет экологической и экономической альтернативы.

В США специализированные ремонтные производства можно подразделить на три основных типа.

1. Сеть ремонтных предприятий специализированной службы, создаваемая крупными фирмами-изготовителями у своих дилеров, которые занимаются продажей и обслуживанием техники. Специализированная служба организует на предприятиях дилеров участки, цехи или поточные линии по восстановлению деталей ограниченной номенклатуры.

2. Отдельные специализированные заводы по восстановлению и ремонту агрегатов и узлов определенной номенклатуры, которые непосредственно не связаны с каким-то одним автопроизводителем. Уровень производства на заводах ограничен годовой программой восстанавливаемых изделий, выпускаемых различными фирмами-изготовителями.

3. Небольшие фирмы, занимающиеся восстановлением узкоспециализированной номенклатуры деталей (не более двух-трех наименований).

Еще одним аргументом в пользу развития ремонтных предприятий является резолюция участников II Международного конгресса «Surface Engineering», проходившего в Великобритании в конце 80-х годов прошлого века, которые признали приоритетным направлением в области технической политики повышение долговечности и надежности изделий путем нанесения различного рода покрытий на рабочие поверхности, их упрочнение и восстановление первоначальных размеров и свойств всевозможными технологическими методами.

Необходимо отметить экологические и экономические преимущества ремонтного принципа перед принципом безремонтного обеспечения жизнедеятельности технических средств. При безремонтном принципе эксплуатации машин коэффициент использования возможностей изделий ничтожно низок, можно сказать, что в этом слу-

чае промышленность создает антропогенный мусор. И если на микроэкономическом уровне выпуск «разовой» продукции оказывается высокорентабельным для производителя, то макроэкономика все более ощущает его экологическую опасность. Следует напомнить, что 50% антропогенных загрязнений приходится на долю США, население которых составляет только 5% от мирового. Образующийся мусор загрязняет окружающую среду и нарушает ее экологический баланс как в отдельных регионах, так и в масштабе всей планеты.

Необходимость восстановления окружающей среды путем обезвреживания техногенных сред и экологически безопасной переработки антропогенного мусора предопределила создание нового направления ремонта – утилизации (от лат. *utilis* – полезный). Очевидно, что утилизация становится важнейшей задачей современности. Утилизация показывает, что безремонтный принцип на самом деле не является чисто безремонтным, и подтверждает безусловную необходимость проведения ремонта.

В последние годы утилизация уверенно формируется и развивается как самостоятельная система, которая включает сбор, сортировку и переработку исчерпавших ресурс технических средств. При этом интенсивно разрабатываются новые технологии и средства переработки, такие как ресалтинг – механическое дробление твердых промышленных объектов и отходов, например, с помощью шредерных установок. Весьма перспективными являются технологии низкотемпературного измельчения, дробления озоновым потоком или при помощи высокого давления, а также технологии, основанные на явлении кавитации при использовании в жидкостях электрогидравлических эффектов и др.

Несмотря на запаздывающее развитие ремонтных технологий, они в последние годы начинают оказывать все большее влияние на технологии основного производства (технологии изготовления новых изделий). Для примера: если при выпуске продукции некий размер оказывался ниже допустимого, то это являлось неисправимым браком, тогда как для ремонтного производства это обычный устранимый дефект. В результате для «спасения» брака основное производство заимствовало из ремонта различные технологии наращивания размеров (например, напыление, наплавка, напекание и др.). Сейчас в современном производстве введение в технологический процесс изготовления деталей операций напыления и наплавки износостойкого, прочного покрытия на низкоуглеродистые стали позволяет резко повысить качество изделий и сэкономить дорогостоящие специальные металлы и сплавы,

тем самым снизив себестоимость продукции. Кроме того, технологии восстановления дают возможность принципиально изменить пути достижения точности. Так, традиционные методы достижения точности путем удаления материала поверхностного слоя заготовки механической обработкой режущими инструментами в ряде случаев заменяются новыми методами, основанными на процессах нанесения материала в виде тончайших слоев, которые позволяют буквально конструировать деталь и получать ее размеры с высокой точностью.

Восстановление деталей – это процесс возобновления их исправного состояния и ресурса путем возвращения им утраченной из-за изнашивания части материала и доведения до нормативного уровня свойств, изменившихся за время длительной эксплуатации машин. Восстановление изношенных деталей является основой всего процесса ремонта машин. Разработка эффективных технологических процессов восстановления деталей сложной формы, изготовленных из материалов с высокими прочностными и специальными свойствами, в настоящее время является актуальной задачей для ремонтных предприятий.

Для того чтобы обеспечить ресурс ремонтируемых деталей не менее ресурса новых изделий, восстановление необходимо производить с помощью прогрессивных технологий и методов с использованием материалов высокого качества. При этом помимо восстановления необходимых размеров и формы деталей требуется уделять большое внимание повышению эксплуатационных свойств рабочих поверхностей путем формирования слоя с особыми свойствами. Для этого необходимо знать условия эксплуатации, механизм разрушения поверхностей и зависимости эксплуатационных свойств от параметров качества поверхностного слоя, таких как микрогеометрия, структура, наклёп, остаточные напряжения и др.

Представленное учебное пособие написано на основе ранее изданных учебников, монографий, опубликованных научных статей, а также собственных исследований авторов. Изложенный в учебном пособии материал представляет синтез известных и новых знаний в области восстановления деталей и ремонта автомобилей, который позволит студенту более глубоко изучить особенности современных ремонтных технологий, необходимых для эффективного поддержания растущего парка автомобилей в рабочем состоянии.



## 1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ

---

### 1.1. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей путем управления несущей способностью поверхностного слоя

Эксплуатационные свойства деталей машин зависят от состояния поверхностного слоя, его качества и несущей способности. Под несущей способностью следует понимать показатель, наиболее полно характеризующий способность изделия выполнять заданные функции при установленных условиях нагружения. В качестве критерия несущей способности деталей в зависимости от условий эксплуатации могут быть использованы предельная нагрузка, время и число циклов до образования дефектов, пределы текучести и ползучести, временное сопротивление, критические деформации, контактные пределы текучести и выносливости, твёрдость поверхностей. Так, в качестве критерия несущей способности соединений с натягом достаточно часто используют усилие распрессовки, а подвижных сопряжений – коэффициент трения.

Несомненно, несущая способность зависит от всей совокупности свойств материала и параметров качества поверхности и точности детали, полученных в процессе обработки.

Обеспечение эксплуатационных свойств путем управления несущей способностью поверхностного слоя показано на рис. 1.1.

Состояние поверхностного слоя в процессе эксплуатации и условия нагружения образуют сложную динамическую систему, которая должна находиться в состоянии квазистатического равновесия. Изменение состояния поверхностного слоя при работе детали влечёт за собой изменение условий нагружения и формирования площади контакта. В частности, приработка рабочих поверхностей и формирование вторичных структур приводят к снижению коэффициента трения в подвижных сопряжениях, в результате чего уменьшаются действующие нагрузки и изменяется характер их воздействия. Это увеличивает несущую способность поверхностного слоя.

Возможны условия нагружения, при которых для данных параметров поверхностного слоя равновесное состояние динамической системы не наступает, так как не образуются стабильные вторич-

ные структуры. В этом случае не обеспечиваются нормальные условия контактного взаимодействия: увеличиваются рабочие нагрузки и температура в зоне трения. В результате образуются задиры и наблюдается интенсивное изнашивание рабочих поверхностей. Поэтому эксплуатационные свойства поверхностного слоя в ходе процесса восстановления, особенно на операциях окончательной обработки, должны формироваться целенаправленно с учётом конкретных условий эксплуатации и возможного механизма разрушения, а также с учётом явления технологической наследственности.



Рис. 1.1. Схема обеспечения эксплуатационных свойств путем управления несущей способностью поверхностного слоя

### *Контрольные вопросы*

1. Что понимается под несущей способностью поверхностного слоя деталей?
2. Какие критерии могут быть использованы для оценки несущей способности поверхностного слоя деталей?
3. Какие факторы обуславливают несущую способность поверхностного слоя при работе деталей?
4. Что происходит, если состояние поверхностного слоя детали не соответствует условиям её нагружения?
5. Почему изменение состояния поверхностного слоя детали приводит к изменению условий её нагружения?

### **1.2. Точность деталей**

При восстановлении автомобилей особое внимание обращают на один из важнейших показателей качества – точность. Под точностью детали понимается соответствие ее геометрических параметров (размеров, формы и взаимного положения исполнительных поверхностей) требованиям чертежа и технических условий.

Точность необходима не только для непосредственного выполнения изделием служебного назначения, но и является одной из предпосылок длительной его эксплуатации. Этим объясняется непрерывное повышение требований к точности восстановления деталей и машин в целом. Примечательно, что за последнее столетие точность деталей машин выросла почти в 2000 раз. Анализ проблемы точности и динамики её роста приводит к выводу, что все параметры точности будут ужесточаться еще больше. В ряде развитых индустриальных стран уже введено понятие «нанотехнология», предусматривающее как получение, так и измерение параметров, прежде всего геометрического характера, с точностью до одной миллиардной метра. Таким образом, нанотехнология призвана сменить микротехнологию.

Достижение заданной точности даже на высокоточном оборудовании деталей сопряжено со значительными трудностями из-за возникновения технологических упругих и остаточных деформаций. Поскольку абсолютное достижение номинальных (идеальных) размеров и других показателей точности невозможно, то погрешность изготов-

ления детали ограничивается допуском. Допуск представляет собой разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами и назначается конструктором исходя из служебного назначения детали. С уменьшением величины допуска при неизменном номинальном размере возрастает точность детали.

Величина допуска определяется двумя независимыми факторами: номинальным размером детали и её точностью, т. е. деталь любого номинального размера может иметь любую точность, и допуск может быть определён по формуле

$$\delta = a \times i, \quad (1.1)$$

где  $i$  – масштабный коэффициент;  $a$  – коэффициент точности.

Масштабный коэффициент указывает на то, что детали одинаковой точности, но разных номинальных размеров должны иметь различные по величине допуски. Очевидно, нельзя считать имеющими одинаковые точности детали с одинаковыми допусками и разными номинальными размерами, например, 1 и 1000 мм. Деталь с большим номинальным размером при одинаковой точности должна иметь большую величину допуска, чем деталь с меньшим номинальным размером.

Опытным путём установлена зависимость масштабного коэффициента от номинального размера:

$$i = 0,00045 \sqrt[3]{D} + 10^{-6} D, \quad (1.2)$$

где  $D$  – номинальный размер детали.

Коэффициент точности характеризует точность детали, т. е. степень приближения размера годной детали к заданному (например, номинальному).

Международными стандартами установлена зависимость коэффициента точности от общепринятой характеристики точности – качества ( $IT$ ):

$$a = 10^{\frac{IT-1}{5}} \approx 1,59^{IT-1}. \quad (1.3)$$

Квалитет – показатель, количественно характеризующий точность, который введён вместо характеристики «класс точности». Допуски двух смежных квалитетов (при постоянном номинальном диаметре) отличаются в 1,59 раза.

Чем больше номер качества, тем ниже точность детали, тем больше величина допуска и тем грубее изготовлена деталь.

Международным стандартом предусмотрено 19 качеств: 01, 0, 1, 2...16, 17.

Качества 12...17 предназначены для габаритных размеров, как правило, грубых, необрабатываемых деталей, например картерно-блоковых изделий.

Качества 5...11 предназначены для размеров деталей, составляющих сопряжения, т. е. ответственных за работу машин.

Качества 1...4 предназначены для размеров особо точных деталей или измерительных устройств, например калибров.

Качества 01, 0 – перспективные, предназначены для развития машиностроения.

Допуски для каждого номинального размера и качества сведены в таблицы допусков и представлены предельными отклонениями от номинального размера.

Достижение заданной точности деталей и готовых машин всегда связано с затратами средств на оборудование, инструмент и др. Чем выше точность деталей (меньше качество), тем существеннее возрастают затраты на их обработку (рис. 1.2, *a*). Проблема соотношения точности и стоимости обработки является основной при разработке технологического процесса восстановления.

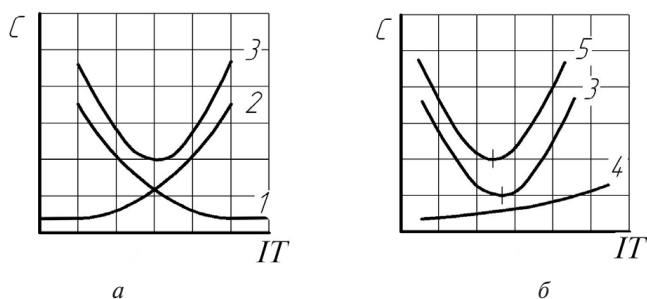


Рис. 1.2. Графики затрат на ремонт (*a*) и эксплуатацию (*б*) в зависимости от точности восстановления изделий: 1 – затраты на восстановление изделий; 2 – затраты на сборку восстановленных изделий; 3 – суммарные затраты на восстановление машины или агрегата; 4 – затраты на эксплуатацию машины или агрегата; 5 – общие затраты на восстановление и эксплуатацию машины или агрегата

Повышение точности восстановления размеров деталей сокращает трудоемкость сборочных работ машин вследствие частичного или полного устранения пригоночных работ, способствует достижению взаимозаменяемости деталей узлов и агрегатов и позволяет ввести поточную сборку. С повышением точности деталей на обработку снижаются расходы на сборку машины. При этом суммарные затраты на ремонт машины имеют некую минимальную величину (в зависимости от точности), к которой надо стремиться при достижении размеров деталей при восстановлении. Точность восстановления деталей, собранной машины или ее отдельных узлов и агрегатов связаны между собой и определяют экономику эксплуатации отремонтированного изделия. За время службы машины эксплуатационные расходы снижаются с повышением точности обработки (рис. 1.2,б). Если эти затраты суммировать с затратами на восстановление машины, то результирующая кривая, характеризующая стоимость восстановления и эксплуатации машины, показывает, что минимум затрат сдвигается в сторону ужесточения допуска на обработку деталей. Это обстоятельство является решающим при технологическом анализе проблем достижения точности размеров деталей в процессе восстановления.

Детали только на чертежах характеризуются номинальными поверхностями, а в действительности ограничены реальными поверхностями, которые всегда имеют отклонения формы.

Отклонением формы называется отклонение формы действительной (реальной) поверхности или действительного профиля от формы геометрической (номинальной) поверхности или геометрического профиля. Отклонения формы подразделяются на элементарные и комплексные. Элементарные отклонения формы для цилиндрических деталей могут быть в поперечном и продольном сечениях. В поперечном сечении различают овальность и огранку (рис. 1.3). В продольном сечении — конусность, бочкообразность и седлообразность (рис. 1.4). Кроме того, в продольном сечении нормируют изогнутость (рис. 1.5).

Комплексные отклонения формы представляют собой совокупность любых отклонений формы поверхности или профиля. Для цилиндрических деталей в поперечном сечении нормируют некруглость, а в продольном — отклонение профиля продольного сечения цилиндрической поверхности, т. е. нецилиндричность (рис. 1.6).

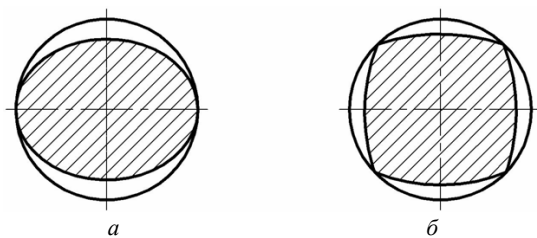


Рис. 1.3. Элементарные отклонения формы в поперечном сечении цилиндрических деталей: *a* – овальность; *б* – огранка

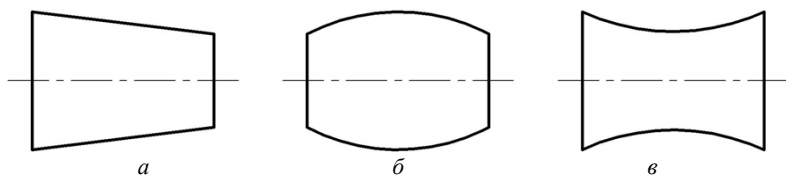


Рис. 1.4. Элементарные отклонения формы в продольном сечении цилиндрических деталей: *a* – конусность; *б* – бочкообразность; *в* – седлообразность

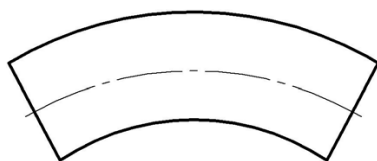


Рис. 1.5. Пространственная погрешность цилиндрической детали – изогнутость

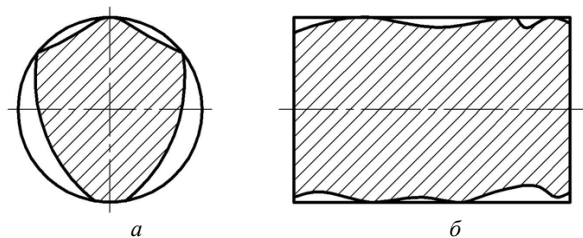


Рис. 1.6. Комплексные отклонения формы цилиндрических деталей: *a* – некруглость; *б* – отклонение профиля продольного сечения

Отклонения формы нормируются десятью степенями точности. Десятая степень точности самая грубая. Элементарные составляющие должны быть на одну степень точнее комплексного отклонения. Например, если на детали допускается некруглость шестой степени точности, то овальность этой детали может быть не грубее пятой степени точности.

Это объясняется тем, что комплексное отклонение может включать различные элементарные.

Отклонения формы образуются в результате упругих деформаций элементов технологической системы, в которой ведется обработка. Упругие деформации возникают непосредственно в процессе механической обработки под воздействием силы резания и вызывают изменение взаимного расположения обрабатываемой детали и инструмента.

Погрешности формы и размеров детали во многом обусловлены следующими факторами: степенью соответствия жесткости обрабатываемой детали и технологической системы; точностью технологического оборудования и оснастки; соотношением составляющих силы резания, зависящих от погрешности заготовки, технологического припуска, подачи инструмента и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

#### *Контрольные вопросы*

1. Что понимается под точностью деталей?
2. Какие два фактора определяют величину допуска на размер детали?
3. Для чего предназначены квалитеты?
4. В чем заключается проблема соотношения точности и стоимости изготовления детали?
5. Какие бывают отклонения формы деталей?

#### **Причины, вызывающие отклонения геометрической формы и размеров при механической обработке**

Достижение заданной точности деталей при механической обработке сопряжено со значительными трудностями вследствие действия ряда факторов, основными из которых являются следующие:

- точность изготовления и износ технологического оборудования (станков), приспособлений и обрабатывающего инструмента;
- погрешность установки заготовки на станке;



- жесткость технологической системы, в которой ведется обработка;
- температурные деформации технологической системы;
- остаточные деформации обрабатываемой детали;
- геометрическое копирование погрешностей обрабатываемой детали;
- погрешность измерения;
- погрешность наладки станка.

Степень влияния перечисленных факторов на точность обработки различна и зависит не только от вида выполняемой операции, но и от типа производства.

Следует отметить, что отклонения размеров и формы деталей во многом обусловлены упругими деформациями элементов технологической системы, в которой ведется обработка. Упругие деформации возникают непосредственно в процессе механической обработки под воздействием силы резания и вызывают изменение взаимного расположения обрабатываемой детали и инструмента.

Технологическая система ДИСП (деталь – инструмент – станок – приспособление) представляет собой упругую систему, деформации которой в процессе обработки вызывают погрешности размеров и геометрической формы деталей.

При обработке резанием гладкого вала нормальной жёсткости в центрах токарного станка в момент нахождения резца у правого конца вала вся величина нормальной составляющей силы резания  $P_y$  (рис. 1.7) передаётся через деталь на задний центр (рис. 1.8). Это усилие приводит к упругой деформации заднего центра  $y_{з.б}$ , вызывая увеличение расстояния от вершины резца до оси вращения детали. Это, в свою очередь, приводит к увеличению радиуса обрабатываемой детали на величину этой деформации.

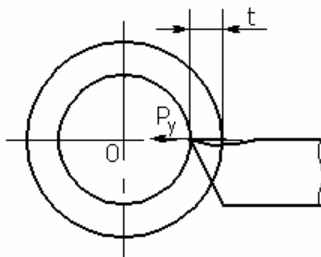


Рис. 1.7. Схема токарной обработки цилиндрической детали:  
t – глубина резания

Одновременно под действием  $P_y$  происходят упругие деформации реза и суппорта на некоторую величину  $y_{ин}$ , что также приводит к увеличению радиуса обрабатываемой детали. В начальный момент обработки радиус детали оказывается больше установленного на величину

$$\Delta = y_{3.б} + y_{ин}. \quad (1.4)$$

При дальнейшей обработке, при перемещении реза от задней бабки к передней, отжатие задней бабки  $y_{3.б}$  уменьшается, но возникают упругие деформации передней бабки  $y_{п.б}$  и обрабатываемой детали  $y_{дет}$ , которые увеличивают ее фактический диаметр.

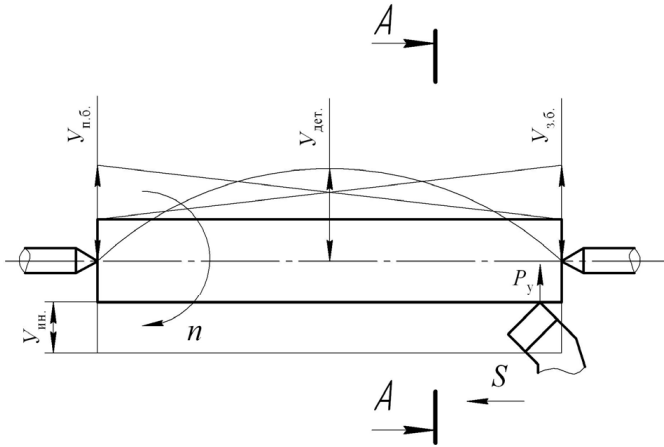


Рис. 1.8. Упругие деформации элементов системы ДИСП при токарной обработке

Так, в некотором сечении детали  $A-A$  ее фактический диаметр может быть определён по формуле

$$d_{фак} = d_{нас} + 2 (y_{3.б} + y_{п.б} + y_{ин} + y_{дет}). \quad (1.5)$$

В связи с тем что упругие отжатия элементов системы ДИСП изменяются по длине обработки, это приводит к изменению диаметра и формы детали. Погрешности размера и формы детали в общем случае равняются сумме упругих деформаций элементов системы ДИСП.

Следует отметить ряд характерных случаев, в которых та или иная упругая деформация одного из элементов системы ДИСП является

преобладающей в процессе обработки и тем самым определяет ту или иную погрешность формы в продольном сечении.

1. Упругие деформации задней и передней бабок равны и больше упругого отжатия обрабатываемой детали. Такое соотношение упругих деформаций характерно для обработки массивных деталей. В этом случае фактический диаметр детали по её краям будет больше, чем в середине. В результате образуется такая погрешность формы, как седлообразность.

2. Упругая деформация детали больше упругих деформаций задней и передней бабок. Такое соотношение упругих деформаций характерно для обработки нежестких деталей, у которых отношение длины к диаметру превышает 12. После обработки детали фактические диаметры по её краям будут меньше, чем в середине, и, как следствие, возникает бочкообразность.

3. Конусность образуется в случае обработки детали нормальной жесткости, упругая деформация которой меньше упругого отжатия одной из бабок. Такое соотношение возникает, например, при обработке детали нормальной жесткости, закреплённой в патроне и в центре задней бабки.

Получение заданной точности детали путём снижения технологических упругих деформаций связано с увеличением жесткости системы ДИСП и точности изготовления её элементов.

Иногда к погрешности формы причисляют изогнутость (рис. 1.5), которая возникает при обработке нежестких деталей. Такое причисление не совсем корректно, поскольку изогнутость образуется не вследствие упругих деформаций элементов системы ДИСП, а в результате изменения напряжённого состояния детали. Поэтому изогнутость следует причислять к пространственной погрешности.

#### *Контрольные вопросы*

1. Какие факторы определяют точность обработки деталей?
2. В результате чего возникают упругие деформации системы ДИСП?
3. Происходит ли изменение упругих деформаций элементов системы ДИСП по длине обработки?
4. К чему приводят упругие деформации системы ДИСП?
5. В каком случае возникает бочкообразность детали?

6. Почему изогнутость детали по большому счету нельзя причислять к погрешности ее формы?

### 1.3. Волнистость поверхности деталей

Волнистостью называется отклонение от прямолинейности или любой заданной формы поверхности, имеющее характер периодических возвышений и впадин с относительно большими шагами.

Допуск на волнистость назначается на максимальную высоту волны на длине измерения не менее 10 мм.

Разграничение неровностей на волнистость и шероховатость носит условный характер. Критерием разграничения является отношение длины шага к высоте волны  $l/H$ . Для волнистости  $l/H = 51 \dots 1000$ , а для шероховатости  $l/H = 0 \dots 50$ .

При обработке деталей волны на поверхности могут образовываться в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В этой связи различают продольную и поперечную волнистость. Возникает волнистость в результате вибраций системы ДИСП, неравномерности подачи инструмента, неправильной заправки шлифовального круга и др.

Износостойкость сопрягаемых деталей в значительной степени зависит от волнистости. Это главным образом связано с тем, что наличие волны приводит к уменьшению опорной поверхности детали (рис. 1.9). Износ поверхностей начинается с вершин микронеровностей на участках А (рис. 1.9,б), что и определяет интенсивность изнашивания.

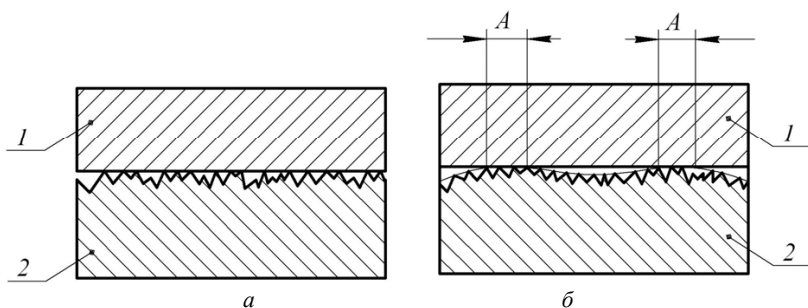


Рис. 1.9. Сопряжение идеальной поверхности 1 с поверхностью 2, имеющей: а – только микронеровности; б – волнистость, покрытую микронеровностями

Значительный износ изменяет расчетные значения зазоров и натягов. Это, в свою очередь, приводит к возникновению динамических нагрузок. Поэтому волнистость рабочих поверхностей предопределяет высокий уровень вибрации, например в подшипниковых узлах, и, как следствие, их малый ресурс.

Волнистость можно рассматривать как отклонение формы второго порядка, а шероховатость – как отклонение формы третьего порядка (рис. 1.10).

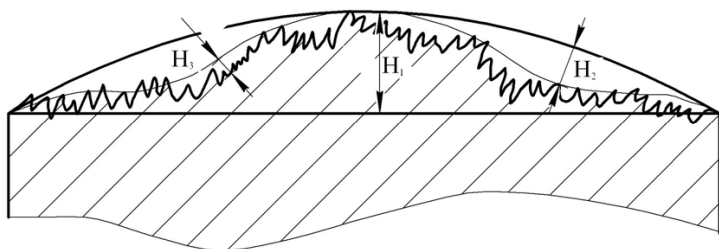


Рис. 1.10. Схема отклонений формы в продольном сечении детали:  
 $H_1$  – бочкообразность;  $H_2$  – волнистость;  $H_3$  – шероховатость

### **Контрольные вопросы**

1. Что понимается под волнистостью поверхности детали?
2. Каковы причины возникновения волнистости поверхности детали?
3. Какой критерий лежит в основе разграничения неровностей на волнистость и шероховатость?
4. Из-за чего увеличивается интенсивность изнашивания волнистой поверхности детали?
5. К каким последствиям приводит эксплуатация детали, имеющей волнистую поверхность?

## **1.4. Шероховатость поверхности деталей**

Одной из важных геометрических характеристик детали, определяющих безотказность работы, является шероховатость поверхности. Шероховатостью поверхности называется совокупность неровностей на рассматриваемой поверхности с относительно малыми шагами, образующая микрорельеф поверхности. По профилю шероховатости

на длине  $l$  базовой линии оценивают ее параметры. Отношение шага неровностей к их высоте для шероховатости не превышает 50. Шероховатость поверхности ухудшает качественные показатели работы деталей. В подвижных соединениях она приводит к преждевременному износу поверхностей, так как при работе деталей металлические гребешки срезаются и стираются, продукты износа смешиваются с маслом и ускоряют процесс изнашивания поверхностей. В неподвижных соединениях шероховатость ослабляет их статическую прочность. Кроме того, шероховатость ухудшает герметичность соединений и коррозионную стойкость изделий.

Для количественной оценки шероховатости в основном используют два высотных показателя: среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a$  и средняя высота шероховатости  $R_z$ . Для их определения через кривую, описывающую профиль шероховатости, проводят прямую (рис. 1.11), которая делит выступы и впадины так, что сумма площадей выступов  $F_{выст}$  равна сумме площадей впадин  $F_{вп}$ . Такая прямая называется средней линией. Условие средней линии записывается формулой

$$\sum_{i=1}^{n_{выст}} F_{выст} = \sum_{i=1}^{n_{вп}} F_{вп}. \quad (1.6)$$

Сумма расстояний от средней линии до отдельных точек профиля  $y_i$ , делённая на их количество, называется средним арифметическим отклонением профиля  $R_a$ :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1.7)$$

и обозначается  $\sqrt{R_a} = 0,32$ .

Вторым высотным параметром шероховатости является средняя высота шероховатости  $R_z$ , определяемая как среднее расстояние между пятью точками выступов и пятью точками впадин:

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 H_{max\ i} - \sum_{i=1}^5 H_{min\ i} \right). \quad (1.8)$$

Отсчёт расстояний ведётся от линии, параллельной средней линии. Средняя высота шероховатости обозначается  $\sqrt{R_z} = 40$ .

Параметры  $R_a$  и  $R_z$  имеют размерность в микрометрах и назначаются из геометрического ряда со знаменателем 2. Высотные параметры  $R_a$  и  $R_z$  являются основными при оценке шероховатости. Параметр  $R_z$

рекомендуется применять для поверхностей с большой ( $R_z > 20$  мкм) и малой ( $R_z < 0,08$  мкм) шероховатостью, а параметр  $R_a$  – для поверхностей со средней шероховатостью ( $0,08 < R_a < 20$  мкм). Это определяется техническими возможностями существующих методов и приборов для оценки параметров шероховатости. Кроме параметров  $R_a$  и  $R_z$  большое распространение получили следующие показатели.

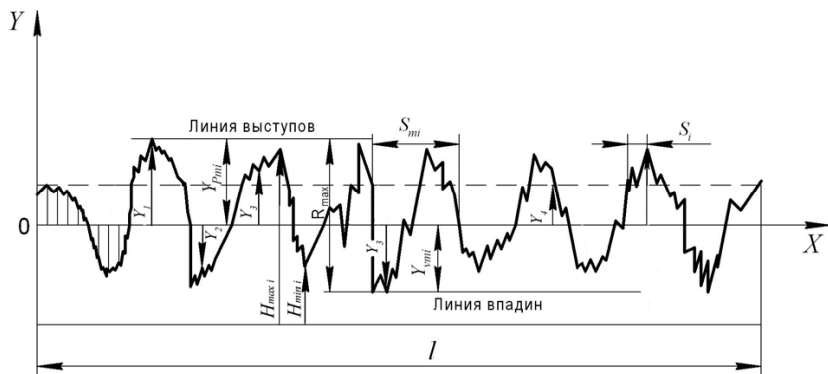


Рис. 1.11. Схема определения параметров шероховатости поверхности детали

1.  $R_{\max}$  – наибольшая высота неровностей, равная расстоянию между линией выступов и линией впадин профиля в пределах базовой длины. Линии выступов и впадин профиля – это линии, параллельные средней линии, проходящие соответственно через высшую или низшую точку профиля в пределах длины.

2. Средний шаг неровностей профиля  $S_m$  – среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины:

$$S_m = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} S_{mi}, \quad (1.9)$$

где  $n_2$  – число шагов в пределах базовой длины;  $S_{mi}$  – шаг неровностей профиля  $i$ -го участка, т. е. длина отрезка средней линии между одноименными точками профиля.

3. Средний шаг местных выступов профиля  $S$  – среднее арифметическое значение шагов местных выступов профиля (по вершинам) в пределах базовой длины:

$$S = \frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} S_i, \quad (1.10)$$

где  $n_3$  – число шагов неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины;  $S_i$  – шаг местных выступов профиля, т. е. длина отрезка средней линии между проекциями на нее двух наивысших точек соседних выступов профиля.

Шаговые параметры  $S$  и  $S_m$  определяют взаимное расположение одноименных точек неровностей, а также форму микропрофиля. С увеличением  $S$  и  $S_m$  при неизменных высотных параметрах  $R_a, R_z$  микропрофиль становится более пологим. По мере уменьшения разницы между  $S$  и  $S_m$  профиль неровностей становится более однородным, т. е. регулярным.

4. Относительная опорная длина профиля  $t_p$  – это отношение опорной длины профиля  $l_p$  к базовой длине  $l$  (%):

$$t_p = \frac{l_p}{l} \cdot 100\%, \quad (1.11)$$

где  $l_p$  – опорная длина профиля, которая определяется суммой длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне  $p$  выступов профиля линией, параллельной средней линии в пределах базовой длины:

$$l_p = \sum_{i=1}^{n_4} B_i, \quad (1.12)$$

где  $B_i$  – длина отрезка, отсекаемого на выступе профиля;  $n_4$  – число отсекаемых выступов профиля.

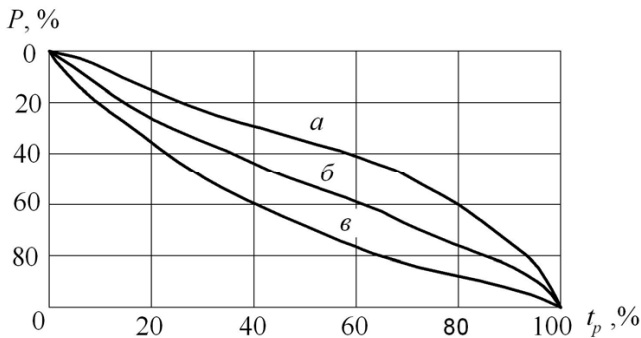


Рис. 1.12. Кривые опорных линий профилей:  $a$  – жесткого;  $\bar{b}$  – средней жесткости;  $b$  – малой жесткости



Уровнем сечения профиля  $p$  называется относительное (в %) расстояние между линией выступов профиля и линией, пересекающей профиль параллельно линии выступов. Числовые значения относительной опорной длины профиля  $t_p$  выбираются из ряда: 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%, а значения уровня сечения профиля  $p$  из ряда: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90% от  $R_{\max}$ . Параметр  $t_p$  дает наиболее полное представление о форме неровностей, степени заполнения профиля металлом и его жесткости (рис. 1.12).

Перечисленный комплекс параметров шероховатости позволяет охарактеризовать высоту, шаг и форму микрорельефа. При одинаковых высотных параметрах микрорельеф может иметь различные форму, шаг и жесткость (рис. 1.13), следовательно, может оказывать различное влияние на эксплуатационные свойства детали.

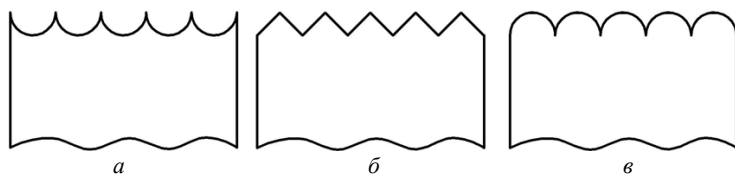


Рис. 1.13. Микропрофили шероховатой поверхности детали:  
 $a$  – малой жесткости;  $b$  – средней жесткости;  $v$  – жесткий

На эксплуатационные свойства поверхности детали помимо указанных высотных и шаговых параметров микропрофиля оказывают влияние также радиусы закругления выступов  $r_v$  и впадин  $r_{\text{вп}}$  неровностей, углы наклона их боковых сторон к средней линии  $\beta$  и расстояние от линии выступов до средней линии  $R_p$ . Эти показатели, в некоторой своей части отражаемые соотношением высотных и шаговых параметров микропрофиля, оказывают существенное влияние на характер контактного взаимодействия сопряженных поверхностей деталей. Так, износостойкость зависит от высоты и формы микронеровностей, радиуса закругления их вершин; коррозионная стойкость зависит от высоты микронеровностей, радиусов закругления впадин, среднего шага неровностей микропрофиля; контактная жесткость зависит от относительной опорной длины микропрофиля поверхности,

радиуса закругления вершин, шага неровностей профиля, угла наклона боковых сторон микронеровностей и т. д.

Оценка шероховатости поверхности может осуществляться качественными и количественными методами. Качественные методы оценки основаны на сравнении обработанной поверхности с образцами шероховатости. Контроль шероховатости путем сравнения со стандартными образцами или аттестованной деталью широко используется в ремонтном производстве. Количественные методы основаны на измерении микронеровностей специальными приборами. Наибольшее распространение для определения шероховатости поверхности получили шуповые приборы, работающие по методу ощупывания поверхности алмазной иглой. К этой группе приборов относятся профилометры, непосредственно показывающие среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ , и профилографы, записывающие профиль поверхности. Отечественной промышленностью выпускаются профилометры-профилографы моделей 201; 202; 280; 171311, а также профилометры моделей 253, 283, 170622, которые позволяют измерять параметр шероховатости  $R_a$  до 0,02...0,04 мкм.

Необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что классов чистоты поверхности в настоящее время не существует. До 1973 года шероховатости обозначались классами чистоты от 1 до 14. Причём первый класс был самым грубым. Такое нормирование противоречило общепринятым понятиям о «первоклассной» чистоте. Поэтому до 1973 года понятие «класс чистоты» не применялось в нормативной документации, хотя и существовало. С 1977 года по стандарту СТ СЭВ 678-77 понятия «класс чистоты» не существует вовсе. Можно ожидать, что через несколько лет оно появится вновь, но в противоположном направлении. Первый класс чистоты будет соответствовать «первоклассной» чистоте, т. е. оценка точности чистоты будет идти в направлении от «лучшего к худшему».

Ориентировочно шероховатость в зависимости от точности удобно назначать по формуле

$$R_a = 0,04 \cdot 2^{IT-4} = \frac{0,01}{4} \cdot 2^{IT}, \quad (1.13)$$

где  $IT$  – номер качества.

Расчёты по этой формуле приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Шероховатость поверхности, назначаемая в зависимости  
от точности обработки**

<i>IT</i>	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$R_a$ , мкм	0,08	0,16	0,32	0,63	1,25	2,5	5	10	20	40

Параметры шероховатости оказывают влияние на все основные эксплуатационные характеристики, определяющие долговечность и надёжность деталей машин.

Обеспечить необходимую шероховатость рабочих поверхностей можно различными видами механической обработки (табл. 1.2).

Таблица 1.2

**Шероховатость поверхности, достигаемая при различных  
видах механической обработки**

№ п/п	<i>l</i> , мм	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	Методы обработки										
				не более										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	8	80	320	X										
2	8	40	160	X										
3	8	20	80	X										
4	2,5	10	40		X	X								
5	2,5	5	20		X	X								
6	2,5	2,5	10		X			X						
7	2,5	1,25	6,3		X			X	X					
8	0,8	0,63	3,2		X		X		X					
9	0,8	0,32	1,6				X		X		X			
10	0,8	0,16	0,8						X	X	X	X		
11	0,25	0,08	0,4							X	X	X		
12	0,25	0,04	0,2							X	X	X		
13	0,08	0,02	0,1							X	X	X		
14	0,08	0,01	0,05							X		X		

В табл. 1.2 указаны следующие методы обработки: 1 – черновая обработка резцами и фрезами; 2 – чистовая обработка резцами; 3 – чистовая обработка фрезами; 4 – развёртывание; 5 – черновое шлифование; 6 – чистое шлифование; 7 – притирка; 8 – полирование; 9 – доводка. А также параметры: *l* – базовая длина;  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля;  $R_z$  – средняя высота неровностей.

### *Контрольные вопросы*

1. Какие показатели используются для оценки шероховатости поверхности детали?
2. Почему эксплуатационные свойства деталей во многом зависят от шероховатости их поверхностей?
3. Какой показатель определяет жесткость микропрофиля поверхности?
4. Какие методы применяются для оценки шероховатости поверхности детали?
5. В каком случае на поверхности детали получается регулярный микропрофиль?

### **1.5. Основные параметры качества материала поверхностного слоя деталей**

Существует мнение, что на эксплуатационные свойства детали оказывают влияние точность изготовления, шероховатость рабочих поверхностей, марка материала, его структура и твердость.

В отношении микрогеометрии поверхности считалось, что для технологического обеспечения качества изделия достаточно сформировать по высоте заданную чертежом шероховатость независимо от метода ее получения. Такой подход к оценке качества и эксплуатационных свойств обработанных поверхностей является ошибочным. Практика показывает, что одинаковые по точности и высоте шероховатости детали могут иметь различные эксплуатационные свойства. Это объясняется тем, что несущую способность поверхностного слоя детали обуславливает не только шероховатость, но и физическое состояние материала поверхностного слоя.

В ходе технологического процесса происходит не только уточнение размеров, образование необходимой формы и микрорельефа поверхности детали, но и изменение свойств материала у его поверхности.

В процессе обработки поверхностный слой подвергается сильнейшему силовому и термическому воздействию, которое приводит к сдвигу в зернах металла и изменению их размеров и формы. Кроме того, на состояние поверхностного слоя оказывают влияние структурные превращения, адгезионные и диффузионные процессы, химическое взаимодействие с окружающей средой. В результате структура и

физико-механические свойства материала поверхностного слоя детали резко отличаются от основного материала (рис. 1.14).

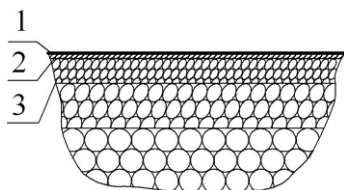


Рис. 1.14. Строение поверхностного слоя детали: 1 – вторичные структуры; 2 – слой повышенной твердости (пластически деформированные зерна); 3 – упругодеформированный слой, свойства которого отличаются от свойств исходного материала

Таким образом, на эксплуатационные свойства деталей наряду с геометрическими параметрами большое влияние оказывает физическое состояние поверхностного слоя. В первом приближении физико-механические свойства поверхностного слоя могут характеризоваться глубиной и степенью упрочнения (эпюрами микротвердости) и величиной, знаком и характером распределения остаточных напряжений (эпюрами остаточных напряжений).

### 1.5.1. Упрочнение материала поверхностного слоя

Упрочнение деталей является одной из важнейших задач технологии восстановления, от решения которой во многом зависит получение качественного изделия.

Для обоснованного выбора наиболее эффективного способа упрочняющей обработки необходимо провести анализ технологических возможностей известных способов в отношении обеспечения микротвердости и остаточных напряжений. Существуют следующие основные виды упрочняющей обработки:

- термоупрочняющая обработка;
- химико-термическая обработка;
- нанесение упрочняющих покрытий;
- поверхностное пластическое деформирование.

Упрочнение материала поверхностного слоя деталей прежде всего характеризуется глубиной упрочненного слоя  $h_s$ , отвечающего за эксплуатацию изделия, и приростом твердости  $\Delta HV$ , т. е.

$\Delta HV = HV_{\max} - HV_0$ , где  $HV_{\max}$ ,  $HV_0$  – максимальная и исходная микротвердость поверхностного слоя, МПа.

Твердостью называется характеристика материала, описывающая его сопротивление пластическому вдавливанию индентора. Индентор (от лат. *in* – внутри, *dentis* – зуб) – твердое вещество (алмаз, закаленная сталь) определенной геометрической формы (конус, пирамида, шар), вдавливаемое в поверхность образца при определении твердости материала.

Определение твердости вдавливанием индентора является одним из наиболее простых и распространенных видов механических испытаний материала.

При испытании на твердость деформируется определенный объем материала. Чем меньше прилагаемая нагрузка, тем меньше деформируется объем, тем точнее выявляется распределение свойств материала.

В зависимости от величины нагрузки, действующей на индентор, различают макротвердость, определяемую при нагрузках свыше 49 Н, и микротвердость, определяемую при нагрузках от 0,049 до 4,9 Н. Между ними находится промежуточная область – твердость при малых нагрузках, которой в настоящее время пользуются очень редко.

При испытании на макротвердость деформируется достаточно большой объем материала, значительно превышающий объем отдельных структурных составляющих материала (например, кристаллитов), поэтому данным методом пользуются для оценки средней твердости материала.

При испытании на микротвердость размер отпечатка настолько мал, что дает возможность определять твердость отдельных структурных составляющих материала.

Испытания на микротвердость применяют для контроля качества очень мелких деталей (например, деталей наручных часов), тонких полуфабрикатов (листов, лент, фольги, проволоки), хрупких неметаллических материалов (стекло, эмали, абразивов), которые растрескиваются при использовании обычных методов оценки твердости. И конечно, испытания на микротвердость широко применяются при оценке твердости различных покрытий.

Для оценки упрочнения также используют степень упрочнения ( $u_n$ ), показывающую относительное (в %) повышение твердости, и

градиент упрочнения ( $u_{ep}$ ), который характеризует интенсивность упрочнения по глубине поверхностного слоя

$$u_n = \frac{HV_{\max} - HV_0}{HV_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta HV}{HV_0} \cdot 100\%;$$
$$u_{ep} = \frac{HV_{\max} - HV_0}{h_э} = \frac{\Delta HV}{h_э},$$
(1.14)

где  $u_n$  – максимальная степень деформационного упрочнения, %;  $u_{ep}$  – средняя интенсивность (градиент) упрочнения в упрочненном слое  $h_э$ , МПа/мм.

Определение глубины, степени и градиента упрочнения производится на основе измерения микротвердости на поверхности косых, прямых шлифов или при послойном стравливании. По результатам измерения строят эпюры микротвердости. Для измерения микротвердости используются микротвердомеры ПМТ-3, ПМТ-5 и др. На приборах этого типа в поверхность шлифа при усилии  $P = 0,5...2$  Н вдавливаются алмазная пирамида с углом при вершине  $136^\circ$ . По среднеарифметическому значению диагонали отпечатка определяется площадь его боковой поверхности  $F$  и микротвердость как отношение силы вдавливания индентора к площади боковой поверхности отпечатка, т. е.  $HV = P/F$ , МПа.

Глубина упрочненного слоя может колебаться в широких пределах: от нескольких микрометров после отделочных операций (например, доводка, полирование, хонингование и др.) до 2 мм после упрочняющих процессов обработки (например, обкатывание роликами, дробеструйная обработка и др.).

Эффективность упрочнения во многом зависит от условий работы детали. Упрочнение замедляет процесс истирания рабочих поверхностей деталей, а также затрудняет образование и развитие усталостных трещин.

Для повышения прочности материала деталей, особенно в условиях ремонтного производства, достаточно широко применяют методы холодного пластического деформирования. Происходящее при обработке этими методами деформационное упрочнение (наклеп) поверхностного слоя сопровождается искажениями (дефектами) кристаллического строения материала.

Необходимо отметить, что минимальная прочность определяется критической плотностью дислокаций, примерно соответствующей отожженному металлу ( $10^7 \dots 10^8$  1/см<sup>2</sup>). Дислокации – это линейные дефекты кристаллической решетки, характеризующейся их плотностью, под которой понимается суммарная длина дислокаций в сантиметрах, приходящаяся на 1 см<sup>3</sup>. При увеличении или уменьшении плотности дислокаций по сравнению с критическим значением возрастает сопротивляемость пластической деформации, т. е. повышается прочность металла. Таким образом, существуют два принципиально разных пути повышения прочности металлов (рис. 1.15).

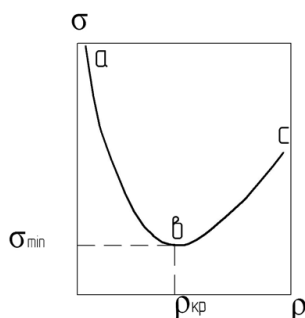


Рис. 1.15. Диаграмма И.А. Одингга

Первый путь широко используется на производстве и связан с получением структуры металла с большой плотностью дислокаций, т. е. с большим числом дефектов кристаллического строения (участок кривой *bc*). Все методы упрочнения (термические, химико-термические, пластического деформирования и др.) основаны на искажении кристаллической решетки металлов. Однако повышение прочности этими методами ограничивается предельной локальной плотностью дислокаций ( $10^{14}$  1/см<sup>2</sup>), при которой происходит образование субмикроскопических трещин в отдельных объемах металла и нарушение его сплошности.

Второй путь повышения прочности металлов основан, наоборот, на уменьшении плотности дислокаций, т. е. на получении бездефектной структуры металлов (участок кривой *ab*). В настоящее время это направление начинает реализовываться при помощи нанотехно-



логий, позволяющих получить бездефектную структуру материала. Так, в лабораторных условиях были приготовлены образцы в виде нитей из чистого железа толщиной 2...10 мкм, прочность которых составила 14000 МПа.

Природа деформационного упрочнения состоит в следующем. Под действием упругопластической деформации происходит интенсивное образование и движение дислокаций. Дислокации самопроизвольно перемещаться не могут. Но уже при небольших напряжениях от внешнего воздействия дислокации начинают двигаться. Движущиеся дислокации, встречаясь с препятствиями (например, с дислокациями, расположенными в другой плоскости), блокируются, т. е. происходит их закрепление. Также при пластическом деформировании происходит дробление зерен на фрагменты и блоки с угловой их разориентацией. У поверхности они измельчаются и вытягиваются в направлении усилия деформирования. Это является основной причиной упрочнения металлов. По-видимому, процесс дробления зерен с усилением искажений кристаллической решетки происходит до известного предела, зависящего от химического состава и физико-механических свойств материала. Как только микроискажения достигнут своего предельного значения, способность кристаллической решетки к дальнейшей деформации оказывается исчерпанной. Если после этого давление от внешней нагрузки будет расти, то последующее дробление блоков приводит к разрыву межзатомных связей, возникновению микротрещин и разрушению поверхности. Это явление называется перенаклепом и проявляется в шелушении обработанной поверхности. Пластическая деформация оказывает существенное влияние на изменение физико-механических свойств металла: повышаются твердость, предел прочности и предел текучести, а характеристики пластических свойств металла, такие как относительное удлинение, относительное сужение и ударная вязкость, наоборот, снижаются.

При обработке закаленных сталей с мартенситно-аустенитной структурой упрочнение не является следствием только образования дислокаций. В деформированном слое наблюдается дополнительное повышение твердости, связанное с распадом остаточного аустенита, его превращением в мартенсит и с образованием в процессе деформации высокодисперсных карбидов, блокирующих сдвиги по плос-

костям скольжения. Следовательно, оба вида упрочнения (дислокационный и дисперсионный), накладываясь друг на друга, приводят к существенному повышению поверхностной твердости при пластическом деформировании закаленных сталей.

Если рассматривать особенности упрочнения различных структур, получаемых в результате термической обработки сталей (рис. 1.16), то можно отметить следующее. При деформации структуры сорбита практически отсутствует дисперсионное твердение и, следовательно, упрочнение происходит за счет размножения дислокаций. Ответственным за упрочнение перлитной структуры также является дислокационный механизм. Однако деформация этой структуры связана с более высоким ростом дислокаций по сравнению с предыдущим случаем.

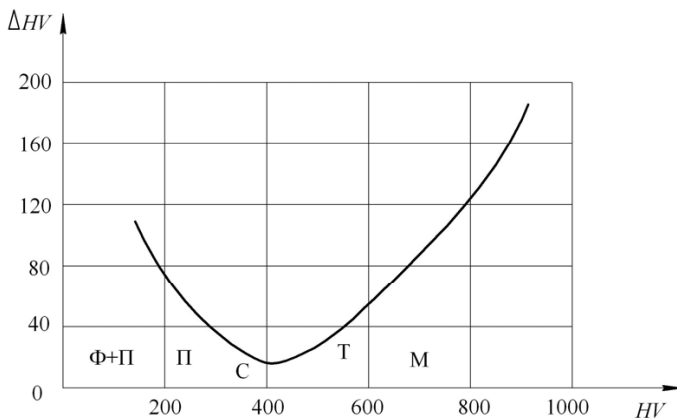


Рис. 1.16. Прирост твердости в зависимости от структурного состояния сталей: Ф – феррит; П – перлит; С – сорбит; Т – троостит; М – мартенсит

Структуру троостита следует рассматривать как промежуточное состояние. Она менее равновесна, чем перлит и сорбит. Поэтому при деформации троостита может наблюдаться дисперсионный распад, усиливающий эффект упрочнения, вызванный дислокационным механизмом.

Деформация мартенситной структуры сопровождается интенсивным дисперсионным твердением при превращении остаточного аустенита в мартенсит. Происходит также и увеличение плотности дислокаций. В этом случае упрочнение определяется действием обоих видов упрочнения.

Необходимо отметить, что у углеродистых сталей прирост твёрдости выше, чем у легированных в том же структурном состоянии и примерно с таким же содержанием углерода. Объясняется это тем, что остаточные искажения кристаллической решётки, возникшие в результате легирования, затрудняют дальнейшее искажение при пластическом деформировании.

Глубина упрочненного слоя и степень упрочнения поверхности детали зависят от метода и режима обработки, а также вида и геометрии обрабатываемого инструмента.

Изменение режима обработки вызывает изменение интенсивности пластической деформации и, следовательно, степени наклёпа. Установлено, что с увеличением усилия деформирования возрастает интенсивность размножения дислокаций, что в конечном счете приводит к увеличению глубины и степени упрочнения. При этом увеличение только продолжительности внешнего силового воздействия на обрабатываемую поверхность вызывает рост глубины наклёпанного слоя. Если увеличивается продолжительность теплового воздействия на деталь, то в результате усиления интенсивности отдыха наклёп поверхностного слоя уменьшается.

Эффективность наклепа растет с увеличением пластичности металлов и концентраторов напряжений в виде канавок, галтелей и др.

Упрочнение поверхностного слоя и образование в нём остаточных напряжений представляет собой единый взаимосвязанный процесс, вызываемый одними и теми же причинами. Однако рост степени и глубины упрочнения прямо не связан с ростом уровня остаточных напряжений и глубины их залегания.

#### *Контрольные вопросы*

1. Какими параметрами в первом приближении могут оцениваться физико-механические свойства поверхностного слоя детали?
2. Какой параметр характеризует упрочнение материала детали?
3. Какие виды упрочняющей обработки вы знаете?
4. Чем отличаются испытания материала на микротвёрдость от испытаний на макротвёрдость?
5. Какие два основных пути повышения прочности материала вы знаете?

### 1.5.2. Технологические остаточные напряжения

Остаточные напряжения являются одним из основных показателей физического состояния изделий, определяющих их работоспособность и надежность. Из-за них происходят аварийные разрушения, казалось бы, надежных конструкций механизмов и машин. Кроме того, остаточные напряжения приводят к возникновению трещин, снижению прочности сцепления покрытия с основным материалом, деформационному изнашиванию, выражающемуся в короблении деталей, и др. Однако до сих пор со стороны специалистов, работающих на производстве, им не уделяется должного внимания.

При расследовании причин некоторых аварий эксперты достаточно часто сталкиваются с такой ситуацией: вид и характер разрушений указывают на наличие в детали предельно допустимого уровня остаточных напряжений, а в документах на самопроизвольно разрушившееся изделие вообще отсутствуют какие-либо сведения о напряжениях. Выходит, что технологические процессы обработки создали в изделии значительные остаточные напряжения, о которых никто не подозревал. Такое положение можно объяснить психологией технических работников, которые в большинстве случаев воспринимают остаточные напряжения как нечто неочевидное, поскольку их нельзя «потрогать руками». Действительно, остаточные напряжения относятся к внутренним силовым факторам, которые в отличие от внешних факторов в виде различных нагрузок не поддаются непосредственному измерению (измерению поддаются только проявления остаточных напряжений, которые выражаются в изменении формы и размеров тела, а также физических, химических или технологических свойств металла). К тому же смутное представление многих технологов о механизмах образования остаточных напряжений при различных способах обработки деталей приводит к тому, что они играют в жизненном цикле деталей и машин больше отрицательную, чем положительную роль. А, между прочим, остаточные напряжения могут, увеличивая прочностные свойства материалов, оказывать существенное сопротивление внешним разрушающим нагрузкам.

Способность управлять напряженным состоянием деталей в ходе технологических процессов обработки и умело использовать его в за-

висимости от условий нагружения является основой повышения качества изделий и надежности их работы.

Тем не менее, несмотря на очевидную значимость остаточных напряжений для эксплуатационных свойств изделий, ни один стандарт не устанавливает для них предельно допустимых значений после проведения различных технологических операций. В этой связи аттестация технологических операций по тому напряженному состоянию, какое они вносят в готовое изделие, является актуальной задачей для технологий изготовления и восстановления деталей.

Остаточными напряжениями называются уравновешенные в объеме детали напряжения, которые возникают после освобождения изделия от всех связей и воздействий.

Эпюру остаточных напряжений можно разделить на активную и уравнивающую части (рис. 1.17), разграничивающиеся в точке, в которой напряжения проходят через ноль. Такой характер распределения остаточных напряжений отвечает уравновешенному напряженно-деформированному состоянию детали.

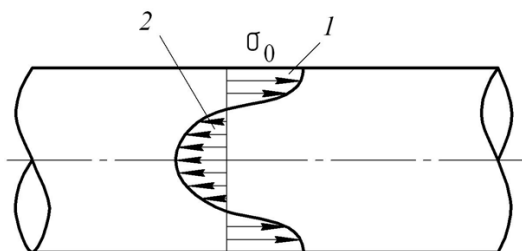


Рис. 1.17. Эпюра остаточных напряжений в детали: 1 – активная часть; 2 – уравнивающая часть эпюры

Остаточные напряжения являются следствием перераспределения начальных напряжений, возникновение которых обусловлено необратимыми объемными изменениями материала под воздействием внешних силовых и температурных факторов. Под начальными напряжениями понимают неравновешенные в поперечном сечении напряжения, которые возникают в первоначальный момент разгрузки, т. е. при освобождении детали от всех внешних связей и воздействий. Поэтому их иногда называют разгрузочными напряжениями. Остаточные напряжения определяют внутреннюю силу в теле детали,

которая либо повышает, либо уменьшает прочностные свойства материала, противодействуя или способствуя действующей деформации от внешней нагрузки. Следовательно, остаточные напряжения могут повышать или снижать эксплуатационные свойства изделий.

Остаточные напряжения можно классифицировать либо по физической сущности их происхождения, либо по протяженности силового поля.

По физической сущности различают термические напряжения, возникающие в результате нагрева (охлаждения), силовые, образующиеся от различных механических воздействий, структурные, возникающие в результате структурно-фазовых превращений материала.

По протяженности силового поля различают:

- напряжения первого рода – макронапряжения, охватывающие области, соизмеримые с размерами детали; они имеют ориентацию, связанную с формой детали. Например, в цилиндрической детали различают осевые, касательные, радиальные напряжения (рис. 1.18), т. е. три взаимно перпендикулярные составляющие напряжений;
- напряжения второго рода – микронапряжения, распространяющиеся на отдельные зерна или группы зерен материала;
- напряжения третьего рода – субмикроскопические напряжения, относящиеся к искажениям кристаллической решетки и имеющие ориентацию, связанную со структурой кристаллической решетки. Субмикроскопические напряжения – понятие весьма условное, так как под ним понимают не напряжения, а статические смещения атомов и узлов решетки из положения равновесия, вызванные точечными дефектами. Поэтому физическую суть этого явления более точно отражает термин «статическое искажение кристаллической решетки».

Все перечисленные напряжения представляют различный уровень необратимых объемных изменений в материале. Для технологии машиностроения и ремонтного дела наибольший интерес представляют напряжения первого рода, поскольку именно они определяют эксплуатационные свойства и точность деталей.

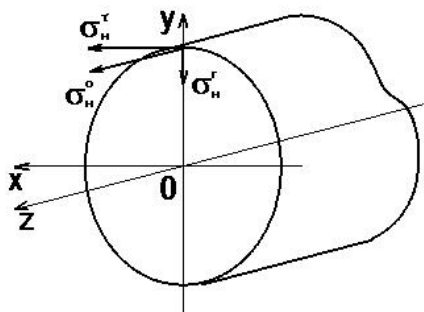


Рис. 1.18. Схема ориентации составляющих начальных напряжений

Возникновение остаточных напряжений обусловлено четырьмя причинами.

1. При механической обработке в поверхностном слое детали развивается силовое поле, вызывающее пластическую деформацию волокон, причем в одном направлении волокна растягиваются, а в другом сжимаются. Так, при воздействии инструмента в виде шара на цилиндрическую деталь происходит растяжение в продольном и окружном направлениях и сжатие в поперечном направлении.

Возникновение остаточных напряжений в волокнах материала выражается в их сжатости или растянутости. Если волокна растянуты (имеют остаточное растяжение), то они стремятся сжаться, следовательно, в них возникают остаточные напряжения сжатия, и наоборот.

2. Развивающаяся пластическая деформация приводит к увеличению удельного объема (снижение плотности) наклепанного материала. Увеличение удельного объема обусловлено ростом плотности дислокаций и вакансий. Возникающие при этом начальные напряжения приводят к образованию остаточных напряжений.

3. Для материалов, склонных к структурно-фазовым превращениям, нагревы и пластическая деформация сопровождаются изменением их удельного объема вследствие перехода из одного структурно-фазового состояния в другое. Например, при превращении остаточного аустенита в мартенсит происходит увеличение удельного объема материала, что и приводит к возникновению остаточных напряжений сжатия в этом слое.

4. Нагревы детали сопровождаются обратимыми и необратимыми объемными изменениями материала. Если только при нагреве детали термические напряжения незначительны (не превышают предел текучести материала), то после ее остывания не возникает никаких остаточных напряжений. Нагрев детали всегда сопровождается снижением предела текучести  $\sigma_T$  материала. Если термические напряжения по своему значению достигают предела текучести  $\sigma_T$ , то только при одном тепловом воздействии в поверхностном слое материала после остывания возникают остаточные напряжения растяжения. При механической обработке присутствуют два фактора – пластическая деформация и нагрев, которые определяют остаточные напряжения. Сложение напряжений от этих двух факторов происходит по принципу суперпозиции (алгебраически). Причем термические напряжения, складываясь с напряжениями от пластической деформации, приводят, как правило, к образованию подслоя максимума остаточных напряжений.

Любая из указанных причин может оказывать преобладающее влияние на остаточные напряжения. Но может случиться и так, что все четыре причины оказывают свое достаточно сильное влияние. Результатом этого является достаточно сложная по характеру распределения эпюра остаточных напряжений.

Управлять напряженным состоянием можно, если обрабатывать деталь в упругонапряженном состоянии. В этом случае можно получить максимальные значения остаточных напряжений сжатия или минимальные значения остаточных напряжений растяжения.

#### *Контрольные вопросы*

1. Что понимается под остаточными напряжениями деталей?
2. Почему под действием остаточных напряжений происходят аварийные разрушения конструкций машин?
3. Чем принципиально отличаются остаточные напряжения от начальных напряжений?
4. По каким признакам можно классифицировать остаточные напряжения?
5. Какие причины образования остаточных напряжений в деталях вы знаете?



## 1.6. Технологические остаточные деформации деталей

Технологические остаточные деформации (коробление) деталей проявляются в виде отклонения оси от прямолинейности или какой-либо другой формы, а также в закручивании, растяжении-сжатии детали, то есть в проявлении так называемой пространственной погрешности (см. рис. 1.5). Во многих случаях точность изделий зависит от остаточных деформаций изгиба.

Причины образования технологических остаточных деформаций изгиба:

- несимметричное распределение относительно оси детали эпюры начальных напряжений;
- изменение упругонапряженного состояния детали, которое возникает либо перед обработкой в результате закрепления детали, либо во время обработки в результате воздействия на нее технологической оснастки.

В свою очередь, несимметричное распределение относительно оси детали начальных напряжений обусловлено:

- асимметричной обработкой, связанной с удалением материала, например, со снятием неравномерного технологического припуска по контуру поперечного сечения цилиндрической детали: фрезерованием лысок, шпоночных пазов и т. д.;
- асимметричной обработкой, не связанной с удалением материала, например, несимметричной наплавкой, сваркой, наклепом и нанесением неравномерного по контуру поперечного сечения покрытия.

Образование технологических остаточных деформаций в результате изменения упругонапряженного состояния детали рассмотрим на следующем примере.

Нежесткую деталь без остаточных деформаций изгиба перед термической обработкой горизонтально устанавливают в муфельной печи. Под действием собственного веса она прогибается на величину, создающую упругонапряженное состояние в теле детали.

В таком упругонапряженном состоянии деталь подвергается термической обработке, например закалке. В процессе термической обработки происходят структурно-фазовые превращения в материале, которые изменяют напряженное состояние детали и уменьшают изгибающий момент, определяющий упругую отдачу изделия. В результа-

те после обработки деталь не вернется в исходное положение, а будет иметь остаточный прогиб.

Очевидно, что первая причина образования остаточных деформаций является доминирующей и тем самым определяет величину и характер пространственной погрешности. Однако может оказаться и так, что обе причины достаточно сильно влияют на неравномерность изменения напряженного состояния заготовки и образование технологических остаточных деформаций. В этом случае значительно усложняется их прогнозирование.

### **1.6.1. Механизм образования технологических остаточных деформаций при обработке деталей**

В течение длительного времени считалось, что образование технологических остаточных деформаций происходит под воздействием остаточных напряжений. Такой взгляд на роль остаточных напряжений является ошибочным, так как остаточные напряжения уравновешены в поперечном сечении и не могут вызвать деформацию детали без нарушения равновесия по какой-либо причине (например, неравномерная релаксация, нарушение сплошности материала и др.). Следовательно, деформация детали может происходить только под воздействием неуравновешенных напряжений. Таковыми являются начальные напряжения, под которыми понимаются неуравновешенные напряжения в детали после обработки, но до её деформации.

К начальным напряжениям можно отнести:

- неуравновешенные напряжения, сформированные в детали в процессе обработки вследствие неоднородной упругопластической деформации и неравномерных объёмных изменений материала по сечению детали, обусловленных нагревом и структурно-фазовыми превращениями;
- неуравновешенные напряжения, образованные из наследственных (сформированных предшествующей обработкой) остаточных напряжений, которые претерпели неравномерное изменение по поперечному сечению детали в процессе её обработки на проводимой технологической операции;
- неуравновешенные напряжения, возникшие из наследственных остаточных напряжений, равновесие которых нарушено релаксационными процессами.

В большинстве случаев процесс обработки детали сопровождается так называемой первоначальной деформацией  $\epsilon_0$ , которая вносится в поверхностный слой и вызывает начальные напряжения  $\sigma_n$ . Начальные напряжения связаны с первоначальной деформацией зависимостью:

$$\sigma_n = -E\epsilon_0. \quad (1.15)$$

Вид обработки и условия её проведения определяют знак и характер распределения начальных напряжений в поперечном сечении детали.

Действие сформированных в процессе обработки начальных напряжений (рис. 1.19) эквивалентно действию внутренних сил и моментов, стремящихся вызвать деформации детали. Этому препятствуют внешние связи, образованные при закреплении заготовки. Величина внутренних сил и моментов зависит от интегральных характеристик  $P_n$  и  $e_n$  эпюры начальных напряжений. Интегральная характеристика  $P_n$  представляет собой вектор, прикладываемый в центре тяжести эпюры и равный по величине ее площади

$$P_n = \int_0^a \sigma_n(x) dx, \quad (1.16)$$

где  $a$  – глубина распространения начальных напряжений;  $\sigma_n(x)$  – начальные напряжения;  $x$  – текущая координата по толщине детали.

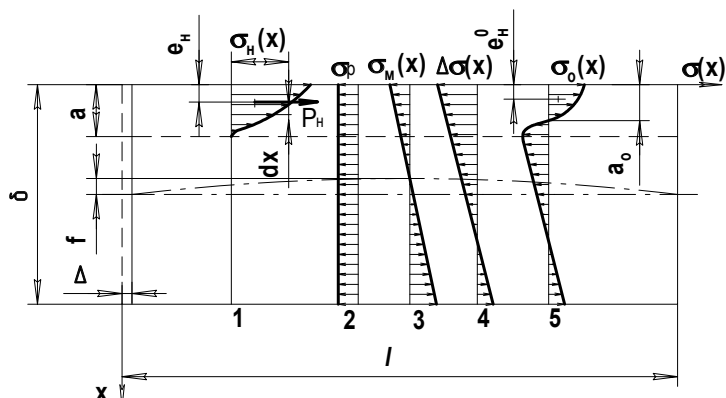


Рис. 1.19. Принципиальная схема образования остаточных напряжений и деформаций при односторонней обработке детали: 1 – начальные напряжения; 2, 3 – часть начальных напряжений, которые релаксируют в результате продольной и изгибной деформаций; 4 – суммарные начальные напряжения, которые релаксируют в результате деформаций; 5 – образованные остаточные напряжения

Показатель  $P_{\text{н}}$  учитывает уровень и глубину распространения начальных напряжений в поперечном сечении детали, не раскрывая сложный характер их распределения. Расстояние от поверхности детали до центра тяжести эпюры  $e_{\text{н}}$  обуславливает изгибающий момент от начальных напряжений.

После раскрепления детали, т. е. после снятия всех внешних связей и нагрузок, происходит процесс разгрузки, при котором действие внутренних сил и моментов, обусловленных осевыми начальными напряжениями, в общем случае вызывает изгибную  $f$  и продольную  $\Delta$  деформации. Действие неравномерных тангенциальных и радиальных напряжений приводит соответственно к закручиванию и искажению формы поперечных сечений. Происходящие деформации сопровождаются перераспределением начальных напряжений по поперечному сечению детали. При этом начальные напряжения, уравниваясь, превращаются в остаточные напряжения, у которых главный вектор и главный момент в сечении равны нулю.

Связь между начальными и остаточными напряжениями может быть выражена зависимостью

$$\sigma_o^o(x) = \sigma_n^o(x) - \sigma_m^o(x) - \sigma_p^o, \quad (1.17)$$

где  $\sigma_o^o(x)$  и  $\sigma_n^o(x)$  – соответственно осевые остаточные и начальные напряжения;  $\sigma_m^o(x)$  и  $\sigma_p^o$  – часть начальных напряжений, которые релаксируют в результате изгибной и продольной деформаций.

Из выражения (1.17) и схемы на рис. 1.19 следует, что образование технологических остаточных деформаций и напряжений представляет собой единый взаимосвязанный процесс, в основе которого лежит формирование и перераспределение начальных напряжений.

Процесс образования технологических остаточных деформаций состоит из двух этапов – образования деформаций после обработки и раскрепления детали либо в процессе обработки, если закрепление заготовки допускает её деформацию; образования деформаций во время хранения, транспортировки и эксплуатации изделия, т. е. при так называемом деформационном изнашивании. Эти этапы существенно отличаются уровнем возникающих остаточных деформаций.

При механической обработке механизм можно представить следующим образом.

Во время обработки вместе с технологическим припуском удаляется часть наследственных (сформированных предшествующей обработкой) остаточных напряжений.

Сам процесс обработки вносит в поверхностный слой дополнительные начальные напряжения. Это нарушает равновесие напряженно-деформированного состояния детали. После обработки и закрепления детали под воздействием неуравновешенных напряжений происходит деформация изгиба.

### 1.6.2. Условия бездеформационной механической обработки

Закономерности образования остаточных деформаций изгиба при механической обработке позволили сформулировать условия бездеформационной обработки.

При двухсторонней обработке необходимо, чтобы в каждом сечении детали суммарный изгибающий момент от действия удаляемых вместе с припуском на обработку наследственных остаточных напряжений  $\sigma_0$  и вносимых процессом обработки дополнительных начальных напряжений  $\sigma_H$  с одной стороны был равен аналогичному суммарному изгибающему моменту, возникающему при обработке противоположной стороны (рис. 1.20,а).

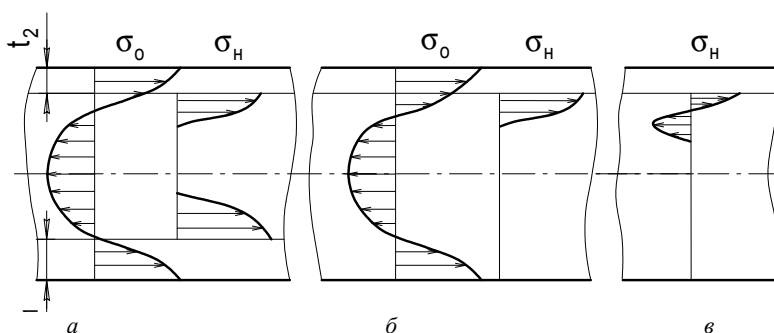


Рис. 1.20. Схемы изменения напряженного состояния в детали, удовлетворяющего условиям бездеформационной обработки:  
а – при двухсторонней обработке; б – при односторонней обработке;  
в – при односторонней обработке в случае отсутствия наследственных остаточных напряжений

- При односторонней обработке детали необходимо, чтобы изгибающие моменты от удаляемых вместе с припуском наследственных остаточных  $\sigma_0$  и вносимых обработкой начальных напряжений  $\sigma_n$  были равны (рис. 1.20,б).

- При отсутствии наследственных остаточных напряжений необходимо, чтобы величина интегральной характеристики  $P_n$  эпюры начальных напряжений  $s_n$  была как можно меньше (рис. 1.20,в).

#### *Контрольные вопросы*

1. В каком виде проявляются остаточные деформации деталей?
2. Каковы причины образования остаточных деформаций деталей?
3. Что представляют собой интегральные характеристики эпюры начальных напряжений?
4. Какие факторы приводят к нарушению равновесного напряженно-деформированного состояния заготовки при механической обработке?
5. Назовите условия бездеформационной механической обработки.

## 2. ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ

---

---

### 2.1. Основные понятия, термины и показатели

Проектирование машин, удовлетворяющих высоким требованиям надежности, долговечности и безопасности эксплуатации, невозможно без решения задач, связанных с созданием условий и обеспечением режимов оптимального взаимодействия поверхностей пар трения, т. е. задач, стоящих перед трибологией и триботехникой.

Трибология – наука о трении и процессах, сопровождающих трение.

Триботехника – наука о контактном взаимодействии тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазывания машин. Основопологающие законы триботехники нашли практическое применение в области разработки, создания, эксплуатации и ремонта разнообразных объектов и технических средств.

Технологу трибология и триботехника дают возможность выбрать наиболее эффективные методы обработки и упрочнения материалов, а специалисту, занимающемуся эксплуатацией, – обеспечить надлежащий режим эксплуатации и обслуживания машин.

Трение возникает при относительном перемещении рабочих поверхностей деталей и сопровождается их изнашиванием.

Изнашивание – это процессы разрушения, отделения частиц материала с поверхности твердого тела и накопления остаточной деформации при трении. Изнашивание проявляется в постепенном изменении размеров и формы тела, а также в изменении взаимного расположения поверхностей детали. Оно приводит к ухудшению функциональных показателей работы машины и определяет ее долговечность. В результате изнашивания нарушается кинематическая точность механизмов, изменяется характер нагружения, появляются дополнительные нагрузки, вибрации и шумы. В основе изнашивания лежат следующие процессы.

1. *Многократное механическое и термическое воздействие на поверхность детали.* Многократное механическое воздействие, при котором контактные напряжения превышают предел текучести, вызывает пластическую деформацию материала и приводит к накоплению оста-

точных деформаций. В результате этого может происходить разупрочнение и разрушение материала, а также коробление изделия. Нагрев поверхности детали при трении до высокой температуры приводит к тепловому изнашиванию, при котором происходит разрушение «сварившихся» неровностей поверхности. Возникновение высоких локальных температур на участках микроконтактов приводит к образованию «мостиков сварки», которые вызывают вырывание частиц материала при относительном перемещении деталей. Циклическое воздействие на металл детали механических и термических напряжений вызывает образование микротрещин в глубине поверхностного слоя с последующим выкрашиванием частиц металла.

2. *Химико-термические воздействия среды на поверхность детали* приводят к изменению физико-механических свойств материала, образованию адсорбированных и окисных пленок.

3. *Наличие смазки в зоне контакта* кроме положительного эффекта может оказывать расклинивающее действие в микротрещинах и способствовать разрушению поверхностного слоя. Так, при расклинивающем действии противоизносной присадки, попавшей при работе газораспределительного механизма в поверхностную трещину, может произойти излом распределительного вала (рис. 2.1). Вид излома распределителя носит явно однородный характер и не имеет двух зон, характерных для усталостного излома.



Рис. 2.1. Излом вала, возникший при расклинивающем действии присадки



4. *Молекулярно-механическое взаимодействие контактирующих поверхностей* сопровождается возникновением и разрушением фрикционных связей, в результате которых осуществляется перенос материала с одной поверхности на другую.

Износ — это некая величина, с помощью которой количественно оценивается изменение размеров, объема и массы деталей, произошедшее в результате изнашивания. Кроме этого, изнашивание характеризуется скоростью, т. е. отношением величины износа к интервалу времени, в течение которого он возник, или интенсивностью изнашивания — отношением величины износа к пути, на котором произошло изнашивание, или к величине выполненной работы.

Повреждаемость — это процесс резко выраженного, недопустимого изменения геометрических параметров и свойств материала деталей в процессе эксплуатации. К повреждениям относятся усталостные трещины и выкрашивание материала, пробоины, коррозия, остаточные деформации (коробление) и др.

Таким образом, все виды дефектов, возникающих в процессе эксплуатации деталей, подразделяются на допустимые (например, износ) и недопустимые (например, повреждения).

## **2.2. Характеристики основных видов изнашивания**

Процессы, вызывающие изнашивание и повреждаемость деталей, работающих при различных условиях и режимах, протекают по-разному и зависят от многих факторов. Поэтому для снижения интенсивности изнашивания и повышения долговечности изделий большое значение приобретает классификация видов изнашивания, позволяющая выделить доминирующие процессы. Классификация (рис. 2.2) предусматривает три основных вида изнашивания: механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое.

*Механическое изнашивание* — утрата первоначальной геометрии и свойств материала детали в результате абразивного, циклического, кавитационного, деформационного и других воздействий на изделие. Оно возникает при контакте и взаимном перемещении сопряженных поверхностей, а также при перемещении твердых частиц (абразива), потоков жидкости и газа относительно поверхности детали.

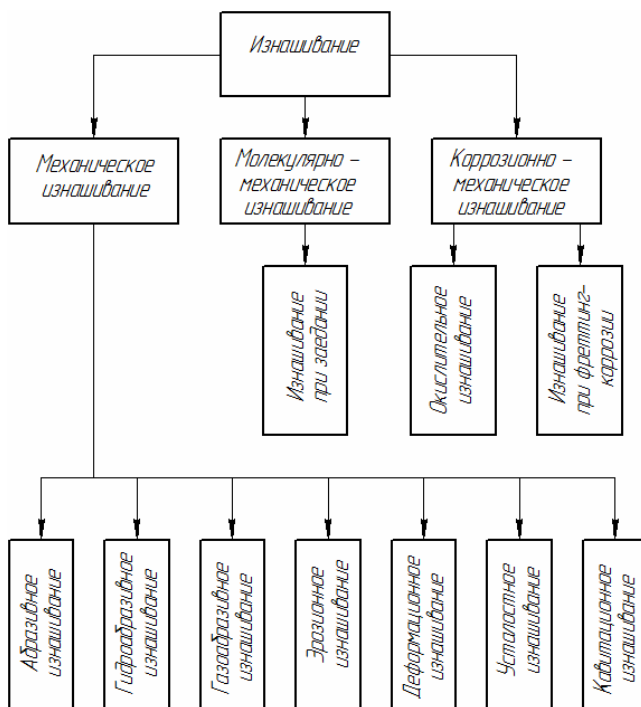


Рис. 2.2. Классификация видов изнашивания

*Молекулярно-механическое изнашивание* проявляется в схватывании металлов, т. е. образовании металлической связи, которая при относительном перемещении деталей приводит к вырыванию частиц металла с одной из поверхностей и переносу их на другую, как правило, более твердую. При малой скорости скольжения деталей размягчение металла частицы не происходит и она, находясь в твердом состоянии, будет оказывать царапающее действие на сопряженную поверхность. При больших скоростях металл частицы легко пластифицируется и размазывается по поверхности.

*Коррозионно-механическое изнашивание* – результат механического воздействия сопряженных поверхностей, которое сопровождается химическим или электрохимическим взаимодействием материала детали с агрессивной средой.

Далее приводится краткая характеристика видов изнашивания.

*Абразивное изнашивание* – механическое изнашивание материала, которое происходит в основном в результате режущего или царапающего действия твердых частиц (абразива), находящихся в свободном или закрепленном состоянии. Этот вид изнашивания характерен для рабочих органов дорожных машин.

Изнашивание деталей машин при воздействии частиц абразива или иных твердых тел по своей природе является механическим и сводится к съему металла с рабочих поверхностей. При изнашивании поверхности под действием абразива постепенно изменяются геометрическая форма и размеры детали, но разрушение на макроуровне, например в виде изломов, не происходит. Эту категорию разрушения из-за малых объемов отделяющихся частиц выделяют в особый вид, называемый истиранием. Истирание происходит при различных условиях контактного взаимодействия сопряженных поверхностей. В этой связи различают трение без смазочного материала (трение ювелирных, т. е. обнаженных поверхностей), при котором коэффициент трения достигает 6...7, и трение со смазочным материалом, при котором коэффициент трения составляет 0,03...0,5. Трение со смазочным материалом в зависимости от вида смазки, условий трения, геометрии трущихся поверхностей бывает сухое, полусухое, жидкостное и граничное. Для сухого и полусухого трения характерны частичные зоны контакта поверхностей трения, на которые действует только смазка, адсорбируемая из окружающей среды, и окисные пленки, на остальной поверхности сосредоточена жидкая смазка; для жидкостного трения характерно полное разделение трущихся поверхностей.

*Гидро- и газоабразивные виды изнашивания* возникают при действии твердых частиц, взвешенных в жидкости или газе, которые перемещаются относительно изнашиваемой поверхности.

*Деформационное изнашивание* – процесс образования остаточных деформаций, которые проявляются в отклонении оси от прямолинейности или какой-либо другой формы, а также в нарушении взаимного расположения поверхностей деталей. Деформационное изнашивание происходит в результате неравномерной релаксации напряжений в процессе эксплуатации под действием рабочих механических нагрузок и температур.

*Усталостное изнашивание* – утрата механических свойств и разрушение металлических деталей под действием циклических нагрузок.

Оно происходит в результате зарождения, развития и распространения усталостных трещин в детали. Этот вид разрушения характерен для деталей, работающих в условиях трения качения и качения с проскальзыванием, таких как подшипники качения, опоры качения, катки, кулачки, зубчатые колеса и др. Трещины зарождаются либо на поверхности в местах концентраторов напряжений, либо в глубине поверхностного слоя в местах максимальных контактных напряжений. Развитие усталостных трещин приводит к выкрашиванию частиц металла, в результате чего поверхность покрывается осповидными впадинами. При знакопеременном нагружении развитие трещин приводит к усталостному излому, например, первичных валов коробки передач или коленчатых валов (рис. 2.3).

*Кавитационное изнашивание* – процесс механического разрушения материала детали от соприкосновения его с движущейся жидкостью, в которой нарушается сплошность ее объема из-за образования и исчезновения полостей, в зоне которых при повышенных давлениях, конденсации паров и растворении газов создаются условия для интенсивных гидравлических микроударов, разрушающих деталь. Этому виду изнашивания подвержены лопадки гидротурбинных установок, гребные винты и др.



Рис. 2.3. Вид усталостного излома коленчатого вала

*Изнашивание при фреттинге* (англ. *fretting*, от *fret* – разъедать, подтачивать) имеет место при малых многократных колебательных перемещениях одной сопряженной поверхности относительно другой

(различают возвратно-поступательные и возвратно-вращательные перемещения).

*Изнашивание при схватывании* возникает при разрыве масляной пленки, обнажении и взаимодействии ювенальных поверхностей сопряженных деталей. Под действием молекулярных сил происходит твердофазная сварка локальных поверхностных контактов, которая при относительном перемещении деталей вызывает глубинное вырывание материала с одной поверхности, перенос его на другую поверхность и абразивное воздействие образовавшихся неровностей на сопряженные поверхности, т. е. задиры (рис. 2.4).

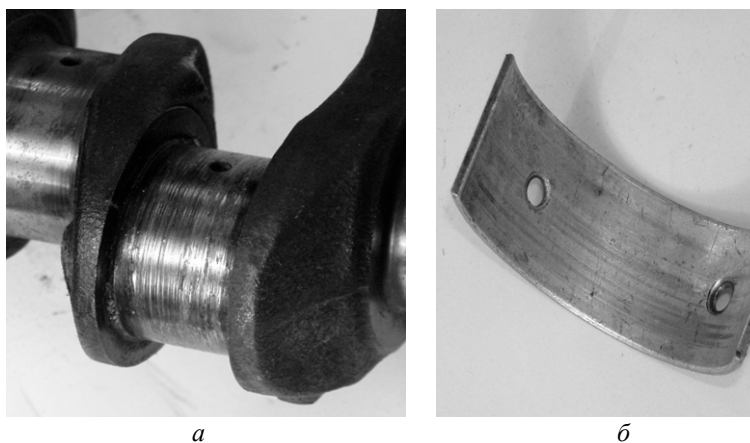


Рис. 2.4. Шейка и вкладыш коленчатого вала со следами задира



Рис. 2.5. Шатун, деформированный при схватывании поршня

Схватывание также может вызывать заедание узла трения. При этом действующие движущие силы могут привести к значительным деформациям деталей механизма. Так, заклинивание поршня приводит к изгибу шатуна в направлении вращения шейки коленчатого вала (рис. 2.5).

*Окислительное изнашивание* представляет собой вид коррозионно-механического изнашивания, при котором основную роль играют химические реакции металлов пары трения с кислородом или окислительной средой. При трении в условиях смазки металлические поверхности вступают в реакцию с кислородом, растворенным в масле или кислородсодержащих элементах. В результате происходит образование окисных пленок. Тонкие окисные пленки (вторичные структуры) на поверхностях трения защищают материал от схватывания. С течением времени они утолщаются и становятся хрупкими, а под действием деформаций постепенно разрушаются и уносятся смазочным материалом. На их месте образуются новые окисные пленки. Скорость их образования зависит от режимов работы узла трения.

*Изнашивание при фреттинг-коррозии* представляет собой коррозионно-механическое изнашивание при вибрациях, т. е. в условиях малых относительных перемещений. При этом виде изнашивания одновременно развиваются два процесса: фреттинг-износ и усталостное разрушение. Первый связан с образованием продуктов окисления, которые при механическом срезании представляют собой абразив. Усталостное изнашивание обусловлено действием циклических нагрузок. Причем развитие усталостных трещин происходит неизменно перпендикулярно направлению фреттинга.

*Эрозионное изнашивание* — изменение размеров и шероховатости твердого тела в результате механического воздействия на него потока жидкости или газа в отсутствии абразивных частиц. Интенсивность эрозии во многом зависит от агрессивности и температуры среды. В автомобиле эрозии часто подвергаются клапаны газораспределительного механизма (рис. 2.6), жиклеры карбюратора, детали амортизаторов.

*Электроэрозионное изнашивание* возникает в результате воздействия на поверхность детали разрядов при прохождении электрического тока через контакт пары трения.



Рис. 2.6. Вид эрозионных повреждений клапана

В общем случае изнашивание деталей является следствием ряда причин: механическое разрушение зацепляющихся неровностей при взаимодействии контактирующих поверхностей; усталостное разрушение неровностей от многократно повторяющихся воздействий неровностей сопряженной поверхности или переменного давления смазки; отслаивание пленок окислов, образующихся при трении, и др. Так, кольцо торцового уплотнения коробки передач с гидроуправляемыми фрикционами подвергается эрозионно-механическому изнашиванию (рис. 2.7), когда в процессе разрушения детали одновременно участвуют струи масла и механическое истирание.



Рис. 2.7. Вид эрозионно-механического износа торцового уплотнения

В случае сложного во внешних проявлениях изнашивания целесообразно различать его ведущий и сопутствующий виды.

Интенсивность изнашивания зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- 1) характер и периодичность действующих нагрузок, скорость перемещения, удельное давление и температура в зоне контакта, т. е. все то, что определяет вид изнашивания;
- 2) конструкция машин и узлов, определяющая условия нагружения, соответствие конструктивной прочности деталей приложенным нагрузкам, а также технологичность и ремонтпригодность конструкции в отношении технического обслуживания и ремонта;
- 3) физические параметры, такие как температура, твердость поверхностей деталей и др.;
- 4) технологические параметры, такие как точность изготовления размеров и формы детали, шероховатость и волнистость её поверхности;
- 5) промежуточная среда – качество и способ подвода смазки, наличие в зоне контакта вторичных структур и абразива (размеры, форма и твердость абразивных частиц);
- 6) условия технического обслуживания и ремонта: качество применяемых горюче-смазочных материалов, квалификация обслуживающего персонала, своевременность и качество выполнения технического обслуживания и ремонта;
- 7) рабочая (окружающая) среда – температура и скорость движения среды, химический состав, обуславливающий ее агрессивность.

#### *Контрольные вопросы*

1. Что представляет собой процесс изнашивания деталей?
2. Какие дефекты возникают у деталей в результате изнашивания?
3. Какие процессы лежат в основе изнашивания?
4. Какие факторы определяют интенсивность изнашивания?
5. Какие виды изнашивания вы знаете?



### 3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ

---

#### 3.1. Влияние параметров поверхностного слоя на износостойкость

*Износостойкость* — это свойство материала детали оказывать в определенных условиях трения сопротивление изнашиванию, т. е. постепенному разрушению поверхностных слоев материала путем отделения его частиц под влиянием сил трения скольжения, качения или микроперемещений.

Необходимо отметить, что в настоящее время термин «износостойкость» используется в более широком смысле, например, как свойство материала детали оказывать сопротивление разрушению при различных видах изнашивания.

В общем случае процесс изнашивания пары трения состоит из трех периодов — приработки, нормального и ускоренного изнашивания (рис. 3.1). Процесс приработки, в основе которого лежат сложные механические, физические и химические процессы, во многом определяет общую износостойкость деталей. К концу периода приработки основные эксплуатационные характеристики поверхности, такие как шероховатость, микротвёрдость, остаточные напряжения, структура граничного слоя металла, цельность поверхности, приобретают оптимальные значения, соответствующие данным условиям эксплуатации. Эти условия определяются материалом трущихся пар, скоростью скольжения, температурой в зоне контакта, удельным давлением и т. д. В начале периода приработки фактическая поверхность контакта пары трения составляет лишь небольшую часть от расчетной величины, так как соприкосновение происходит по вершинам микронеровностей, где развиваются большие удельные давления. Под их действием в местах контакта происходит упругопластическая деформация, приводящая к формированию нового микропрофиля поверхности.

При относительном перемещении поверхностей трения возникает деформация сдвига, которая приводит к срезу и сколу вершин микронеровностей, т. е. к так называемому «начальному износу», вследствие которого быстро увеличивается зазор между трущимися

поверхностями. Интенсивность начального изнашивания обратно пропорциональна площади фактического касания рабочих поверхностей, зависящей от формы единичных микронеровностей и относительной опорной длины профиля поверхности. При этом величина износа может увеличиваться в результате возникновения в точках контакта мгновенных высоких температур, срыва окисной пленки и вскрытия чистого металла с последующим молекулярным сцеплением и образованием узлов схватывания.

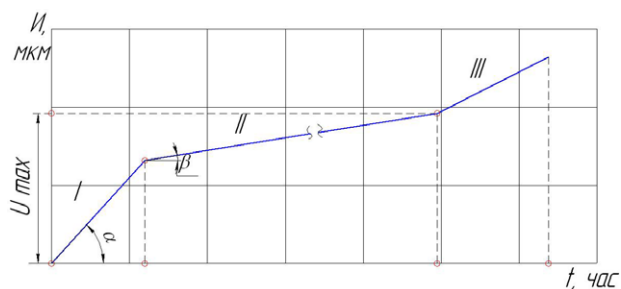


Рис. 3.1. Схема процесса изнашивания пар трения

У деталей, работающих в условиях легкого и среднего нагружения, высота шероховатости в период приработки уменьшается в среднем на 60...70%. Одновременно происходит изменение ее формы. Так, резкое возрастание радиуса закругления вершин микронеровностей  $r_g$  до 850 мкм и уменьшение угла наклона сторон микронеровностей к средней линии  $\beta$  до  $2^\circ$  свидетельствуют, что истирание верхней части микронеровностей достигло уровня, при котором неровности представляют собой основания выступов исходной шероховатости. При этом характеристики микронеровностей  $r_g$  и  $\beta$  достигли своих предельных значений, и в дальнейшем на этой поверхности не происходит изменение микрорельефа.

Процесс истирания сопровождается увеличением площади фактического контакта поверхностей деталей, а следовательно, снижением удельного давления, которое приводит к уменьшению интенсивности начального изнашивания. Исходная шероховатость, полученная после механической обработки (рис. 3.2), преобразуется в «эксплуатационную», т. е. на поверхностях трения формируется так называемая

«оптимальная» шероховатость, при которой происходит наименьший износ для данных условий эксплуатации.

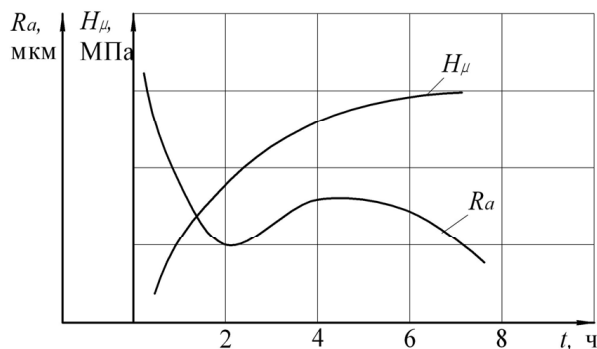


Рис. 3.2. Изменение величины шероховатости  $R_a$  и микротвёрдости  $H_{\mu}$  в процессе приработки

Увеличение высоты шероховатости по сравнению с оптимальным значением повышает интенсивность изнашивания (рис. 3.3) вследствие возрастания механического сцепления, скалывания и среза микронеровностей поверхности. Уменьшение высоты по отношению к оптимальному значению также способствует увеличению интенсивности изнашивания. Это происходит из-за молекулярного схватывания и заедания сопряженных поверхностей. Этот вид изнашивания характерен для деталей гидросистем и двигателей внутреннего сгорания автомобилей.

Например, полированные гладкие поверхности с шероховатостью  $R_a = 0,04 \dots 0,16$  мкм не способны удерживать и транспортировать смазку малой вязкости в зону контакта уплотняющего элемента (например, манжеты), в результате чего возникает большое сопротивление сдвигу при так называемом масляном голодании. Кроме того, за счет роста фактической площади контакта резко увеличивается молекулярная составляющая силы трения, которая приводит к схватыванию. Наоборот, при работе грубых поверхностей вала с шероховатостью  $R_a = 1,25 \dots 2,5$  мкм, хорошо удерживающих смазку, возникают значительные деформации поверхностного слоя более мягкого материала пары. Также происходит увеличение коэффициента трения вследствие возрастания его деформационной составляющей. В результате этого происходит разрыв масляной пленки и повышенный износ уплот-

нения. Кроме того, продукты износа (абразивные частицы), попадая в зону контакта манжеты с валом, застревают в материале уплотнения и ускоряют процесс изнашивания сопряжения.

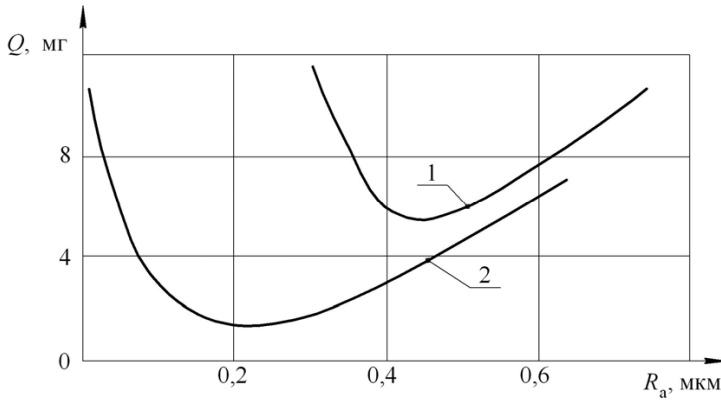


Рис. 3.3. Влияние высоты микронеровностей  $R_a$  на величину износа: 1 – для трудных; 2 – для менее трудных условий трения

Стремление снизить величину износа в процессе приработки и время самой приработки за счёт получения при механической обработке и доводке (например, притирке алмазными пастами) детали микрогеометрии, равной только по высоте «эксплуатационной» шероховатости, как образца, так и контртела приводит к интенсивному изнашиванию молекулярным схватыванием. Это свидетельствует о том, что получение при обработке детали её микрогеометрии с высотой  $R_{max}$ , равной «эксплуатационной», не может являться надёжным показателем оптимальности микрогеометрии, обеспечивающей минимальный износ. Следовательно, на износ влияет не только высота шероховатости, но и её форма. В ряде случаев поверхности с равной по высоте, но различной по форме шероховатостью будут неодинаково изнашиваться из-за большой разницы относительной опорной длины микропрофиля поверхности. Так, по указанной причине поверхность с маложестким микропрофилем (рис. 3.4,а) будет изнашиваться интенсивнее, чем поверхность с жестким микропрофилем (рис. 3.4,б). Вместе с тем острые впадины микронеровностей у поверхности с жестким микропрофилем являются концентраторами

напряжений и будут приводить к интенсивному усталостному и коррозионному изнашиванию.



Рис. 3.4. Различная форма шероховатости при равных высотно-шаговых характеристиках

Очевидно, что под термином «оптимальная микрогеометрия» необходимо понимать оптимальные значения всех характеристик микрогеометрии или какого-то комплексного выражения, наиболее полно отражающего свойства шероховатой поверхности и её влияние на износостойкость.

В качестве такого выражения может выступать комплексная безразмерная характеристика шероховатости несущей поверхности:

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{r_e \cdot b^{1/\nu}}, \quad (3.1)$$

где  $b$ ,  $\nu$  – параметры опорной кривой микропрофиля поверхности, зависящие от метода обработки.

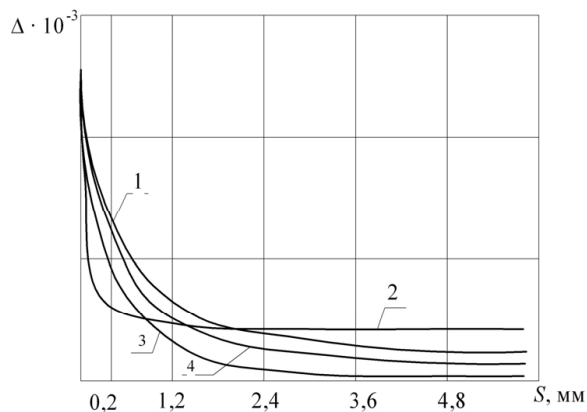


Рис. 3.5. Изменение безразмерного комплекса в процессе приработки:  
 1 – алмазное шлифование торцом круга; 2 – притирка алмазными пастами;  
 3 – обкатывание; 4 – электромеханическая обработка

Результаты экспериментальных исследований изменения безразмерного комплекса  $\Delta$  в процессе приработки образцов, обработанных различными методами (рис. 3.5), показывают, что, несмотря на значительные колебания отдельных характеристик микрогеометрии, имеет место определённая закономерность монотонного уменьшения комплекса в процессе приработки. При этом наилучший результат приработки по показателю  $\Delta$  имеет обкатанная роликами поверхность. Обкатывание увеличивает радиус закругления вершин неровностей, уменьшает угол наклона элементов профиля к средней линии, что придаёт профилю поверхности более плавный, обтекаемый рельеф с большим значением относительной опорной длины поверхности. Оно позволяет приблизить рельеф поверхности к самопроизвольно образующемуся при приработке трущихся поверхностей. Такой рельеф можно считать оптимальным, так как в этом случае имеет место минимальный износ (рис. 3.6). Таким образом, обкатывание позволяет уменьшить длительность процесса приработки и увеличить ресурс сопряжения.

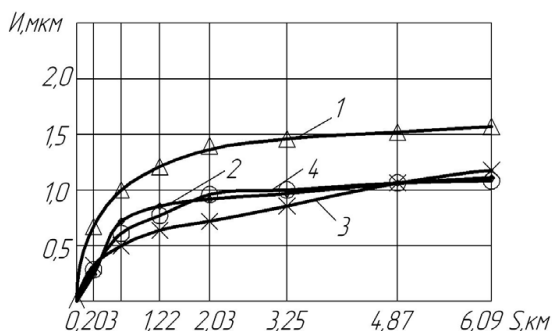


Рис. 3.6. Интенсивность изнашивания в процессе приработки поверхностей, обработанных различными методами: 1 – алмазное шлифование торцом круга; 2 – притирка алмазными пастами; 3 – обкатывание; 4 – электрохимическая обработка

Оптимальные эксплуатационные характеристики в период нормального изнашивания как бы самоподдерживаются, т. е., изменяясь, они непрерывно воспроизводятся в тех же значениях. Такое состояние наблюдается до начала периода ускоренного изнашивания.

Диаграмма изнашивания (см. рис. 3.1) на этапах приработки и нормального изнашивания аппроксимируется двойной линейной

функцией с углами наклона  $\alpha$  и  $\beta$ , которые являются характеристиками интенсивности изнашивания.

Для увеличения долговечности изделий необходимо максимально сократить величину износа во время приработки. Это позволит сохранить практически неизменными расчетные значения зазоров в сопряжениях и тем самым продлить период нормального изнашивания и увеличить долговечность изделия. Снизить интенсивность изнашивания (уменьшить угол  $\alpha$ ) и сократить время приработки можно путем повышения точности обработки поверхностей трения и формирования оптимальных значений параметров качества поверхности изделий в процессе их восстановления, а также за счет применения прирабочных (обкаточных) масел и постепенного повышения нагрузки в процессе приработки.

Долговечность изделий также может быть увеличена за счет повышения продолжительности периода нормального изнашивания при уменьшении угла  $\beta$ . При заданной точности обработки деталей это может быть достигнуто повышением износостойкости поверхностей трения, например, путем напыления износостойкого (упрочненного) покрытия. Необходимо отметить, что в большинстве случаев зависимость между ресурсом и величиной износа имеет линейный характер и во многом обусловлена толщиной упрочненного слоя:

$$t_r = \frac{h_3}{kv_{cp}}, \quad (3.2)$$

где  $t_r$  – ресурс изделия;  $h_3$  – толщина упрочненного слоя;  $k$  – коэффициент запаса долговечности ( $k = 1,2 \dots 1,5$ ), учитывающий разброс эксплуатационных свойств материала и условий эксплуатации;  $v_{cp}$  – средняя скорость изнашивания упрочненного материала.

С целью предупреждения аварийных ситуаций необходимо устранить работу изделий, узлов и агрегатов в период ускоренного изнашивания. Наступление периода ускоренного изнашивания можно предупредить путем выполнения всех мероприятий, предусмотренных системой планово-предупредительного ремонта, с использованием прогрессивных технологий и средств диагностики, основанных на современных электронных системах измерения. Например, период ускоренного изнашивания во многих ответственных агрегатах определяют по уровню

вибрации, и по достижении критического значения амплитуды или частоты колебаний, соответствующих величине предельно допустимого износа  $U_{\max}$ , работа агрегата автоматически прекращается.

Изложенное выше показывает, что необходимо стремиться к тому, чтобы в процессе механической обработки деталей их поверхностям придавался комплекс характеристик, которые возникают к концу периода приработки. Тогда пара трения, почти сразу минуя период приработки (или существенно его сокращая) вступает в период нормального изнашивания. Это способствует увеличению долговечности и надёжности сопряжения, так как дольше сохраняются расчетные значения зазоров и натягов, а поверхности вступают в работу максимально упрочнёнными.

При абразивном изнашивании для разрушения поверхностного слоя к абразивной частице необходимо приложить силу, напряжения от которой способны преодолеть сопротивление металла детали. Если твердость и прочность абразивной частицы выше твердости и прочности металла, а приложенная к ней сила достаточна для поражения металла, то происходит его разрушение. Если твердость и прочность частицы ниже твердости и прочности металла, а приложенная к ней сила достаточно велика, частица разрушается, не разрушая металл.

Механизм разрушения поверхностного слоя детали от воздействия абразивной частицы при трении скольжения можно представить следующим образом. Частица, внедрившись в поверхностный слой и перемещаясь относительно поверхности трения, пластически деформирует, упруго оттесняет, режет и царапает металл. Износ поверхности зависит от твердости металла (рис. 3.7) и абразивной частицы, величины нагрузки и скорости относительного перемещения. Для всех углеродистых и легированных конструкционных сталей после закалки и отпуска относительная износостойкость  $\epsilon$  линейно увеличивается при повышении твердости  $H$  материала детали. Относительная износостойкость  $\epsilon$  связана с относительной износостойкостью отожженных сталей  $\epsilon_0$  зависимостью

$$\epsilon = \epsilon_0 + b'(H - H_0), \quad (3.3)$$

где  $b'$  – коэффициент, зависящий от химического состава сталей;  $H_0$  и  $H$  – твердость материала детали после отжига и закалки.



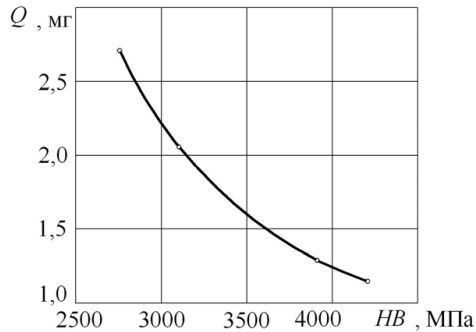


Рис. 3.7. Влияние поверхностной твёрдости  $HB$  детали на величину износа  $Q$

Таким образом, за счет увеличения поверхностной твердости детали можно существенно увеличить ее износостойкость при трении скольжения. Это можно объяснить уменьшением взаимного внедрения поверхностных слоёв трущихся деталей и снижением их совместной пластической деформации.

Необходимо отметить, что с увеличением удельной нагрузки износ обычно увеличивается, а износостойкость уменьшается (рис. 3.8). Продукт изнашивания сталей при умеренных нагрузках представляет собой порошок светло-серого цвета, с увеличением нагрузки — темно-синего.

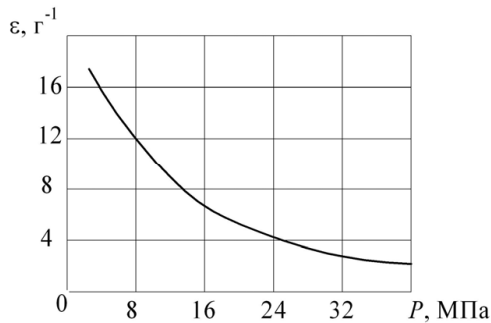


Рис. 3.8. Зависимость износостойкости  $\varepsilon$  сталей от удельной нагрузки  $P$

В условиях трения скольжения поверхности по абразиву с увеличением скорости относительного перемещения в пределах 1,2...10,5 м/с интенсивность изнашивания повышается незначительно (рис. 3.9).

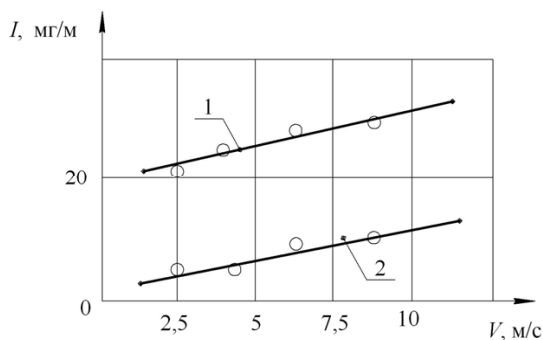


Рис. 3.9. Зависимость интенсивности изнашивания  $I$  от скорости  $v$  скольжения при трении: 1 — по абразиву; 2 — по стали

Рабочие поверхности имеют следы микрорезания, царапанья и вдавливания. При этом наблюдается изнашивание двух видов: абразивное и тепловое. Абразивное изнашивание происходит при скоростях скольжения 1,2...4 м/с, а тепловое 4,0...10,5 м/с. Механизм разрушения материала поверхностного слоя при изменении скорости скольжения такой же, как при изменении удельной нагрузки.

До сегодняшнего дня нет единого мнения о влиянии остаточных напряжений на процесс изнашивания деталей. Это можно объяснить рядом причин.

Во-первых, в проводимых исследованиях влияния остаточных напряжений на величину износа в качестве их характеристики рассматривались либо максимальное значение остаточных напряжений, либо глубина их залегания. Это по существу неверно, поскольку указанные характеристики в полной мере не отражают величину внутренней силы от остаточных напряжений. Так, при одном и том же значении внутренней силы, обусловленной площадью активной части эпюры остаточных напряжений (рис. 3.10), максимальное значение и глубина остаточных напряжений могут существенно отличаться.

Во-вторых, в основном остаточные напряжения оказывают влияние на величину износа в случае, когда процесс изнашивания носит усталостный характер, при котором в поверхностном слое зарождается и развивается трещина. При абразивном и других видах изнашивания влияние на него остаточных напряжений проявляется в меньшей степени.

В-третьих, большую роль в рассматриваемом вопросе играет устойчивость остаточных напряжений в процессе трения.

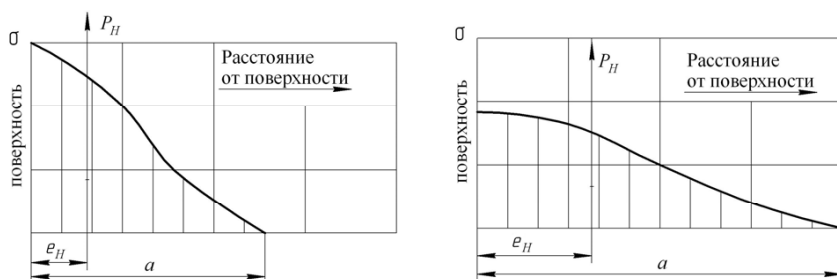


Рис. 3.10. Активные части эпюры остаточных напряжений с одинаковым значением внутренней силы

Если рассматривать действие остаточных напряжений как действие внутренней силы, величина которой определяется площадью активной части эпюры, а направление – знаком остаточных напряжений, то становится очевидной возможность повышения износостойкости путём формирования определённой величины и знака остаточных напряжений при восстановлении детали. Повышение износостойкости за счет остаточных напряжений основано на их возможности противодействовать упругопластической деформации, возникающей при трении. Так, при противоположных знаках деформации и остаточных напряжений последние оказывают сопротивление деформации, а при совпадении – увеличивают её (см. раздел 3.3). Влияние остаточных напряжений на величину износа становится более заметным, если они сохраняются в поверхностном слое длительное время.

Остаточные напряжения в поверхностных слоях высокоточных деталей, какими, например, являются плунжерные пары, остаются неизменными длительное время, поскольку такие детали работают в условиях небольших нагрузок, т. е. в условиях упругого контакта. В этом случае остаточные напряжения сжатия повышают износостойкость поверхности, и наоборот, наличие в поверхностных слоях напряжений растяжения даёт повышенный износ, который тем больше, чем выше уровень остаточных напряжений растяжения. Например, уменьшение

остаточных напряжений растяжения с 730 до 60 МПа увеличивает износостойкость деталей в 1,5...1,7 раза. Следовательно, создание остаточных напряжений сжатия на финишных операциях обработки является необходимым условием повышения износостойкости деталей.

#### *Контрольные вопросы*

1. Сколько периодов включает процесс изнашивания деталей?
2. Как изменяются параметры детали в период приработки?
3. Что понимается под термином «оптимальная шероховатость»?
4. Какие пути повышения долговечности деталей можно предложить на основе анализа диаграммы изнашивания?
5. Каков механизм разрушения поверхностного слоя при абразивном изнашивании?
6. Как влияют остаточные напряжения на износостойкость изделий?

### **3.2. Влияние параметров поверхностного слоя на усталостную прочность**

*Усталостная прочность* — это свойство материала, не разрушаясь, сопротивляться возникновению и развитию трещин при действии повторно-переменных напряжений.

Механизм усталостного разрушения основан на распространении в поверхностном слое многократно повторяющихся высоких контактных напряжений. В результате действия этих напряжений зарождаются микротрещины, развитие которых приводит к выкрашиванию частиц металла (рис. 3.11). Так возникает контактная усталость (питтинг). Изношенная поверхность покрывается кратерами с рваными краями, которые окаймлены грубой поверхностью. Образующиеся кратеры диаметром от сотых долей до нескольких миллиметров увеличиваются в размерах в процессе работы деталей, вызывая шелушение поверхности. Питтинг, как правило, наблюдается вблизи полюса зацепления зубьев шестерен. При этом материал отслаивается



Рис. 3.11. Питтинг боковых поверхностей зубьев шестерни

на площади, значительно превышающей площадь контакта.

При рассмотрении механизма усталостного изнашивания необходимо учитывать тот факт, что разрушение пластичных и хрупких тел различно. У пластичных тел оно начинается в глубине поверхностного слоя, а у хрупких – на поверхности в местах концентраторов напряжений.

Для повышения контактной выносливости необходимо упрочнять поверхностный слой детали на глубину, превышающую глубину действия максимальных касательных напряжений от внешней нагрузки, и формировать в поверхностном слое тангенциальные остаточные напряжения сжатия, которые оказывают сопротивление сдвиговым деформациям. Кроме того, эффективным технологическим мероприятием, направленным на снижение усталостного изнашивания, является нанесение пластичных покрытий на поверхности деталей, которые играют демпфирующую роль. Покрытия позволяют уменьшить значения тангенциальных сил в зоне контакта и глубину распространения максимальных напряжений.

Механизм усталостного разрушения металла в условиях знакопеременного нагружения носит иной характер и завершается усталостным изломом деталей. Излому предшествует образование усталостных трещин, которые зарождаются чаще всего в местах концентрации напряжений (случайные царапины, канавки, выточки, галтели, микродефекты, стыки разных структур и т. п.). При продолжающемся действии переменных напряжений усталостная трещина интенсивно развивается. С её ростом уменьшается поперечное сечение детали, воспринимающее нагрузку, и вследствие недостатка его прочности по трещине происходит долом детали (рис. 3.12). Уменьшению прочности сечения также способствует снижение физико-механических свойств материала детали, которое происходит вследствие циклически изменяющихся во времени напряжений.

Необходимо отметить, что в зависимости от свойств материала и характера приложения нагрузки изломы в месте разрушения детали могут быть вязкими и хрупкими. Примечательно, что усталостные из-

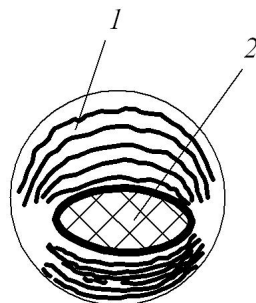


Рис. 3.12. Усталостный излом: 1 – следы фронта трещины; 2 – излом

ломы происходят при напряжениях ниже предела текучести.

Усталостная прочность деталей машин оценивается пределом выносливости  $\sigma_{-1}$ , представляющим собой наибольшее по абсолютной величине (амплитуде) напряжение цикла, при котором материал не разрушается при заданном количестве циклов нагружения.

По числу  $N$  нагрузочных циклов усталость подразделяют на малоцикловую при  $N \leq 5 \cdot 10^4$  и многоцикловую при  $N > 5 \cdot 10^4$ . Зависимость между числом циклов до разрушения и амплитудой максимальных разрушающих напряжений цикла выражается кривой усталости материала.

Следует отметить, что существенное влияние на предел выносливости оказывают концентраторы напряжений и состояние поверхности деталей.

Увеличение высоты шероховатости поверхности детали снижает усталостную прочность (рис. 3.13). Очевидно, это обусловлено изменением характеристик (например, радиуса закругления) впадин микропрофиля. Чем глубже и острее впадина, тем выше концентрация напряжений, а следовательно, быстрее зарождается усталостная трещина.

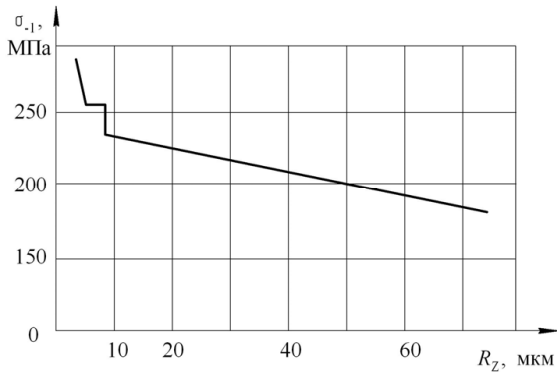


Рис. 3.13. Влияние шероховатости  $R_z$  на предел выносливости  $\sigma_{-1}$

Чувствительность поверхности детали к концентраторам напряжений растёт с повышением прочности материала. В этой связи шероховатость поверхности после механической обработки оказывает на усталостную прочность детали тем большее влияние, чем выше предел прочности её материала.

Усталостная прочность значительно повышается за счет упрочнения металлов и формирования остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое деталей. Это достигается технологическими методами упрочнения, такими как термическая обработка (закалка, в том числе токами высокой частоты), химико-термическая обработка (цементация, азотирование, алитирование и др.), обработка поверхностным пластическим деформированием (дробеструйная обработка, обкатывание поверхности детали роликами или шарами и др.).

Необходимо отметить, что несомненным преимуществом по сравнению с термическими и химико-термическими методами упрочнения обладают методы поверхностного пластического деформирования, так как в процессе деформационного упрочнения происходит завальцовывание поверхностных микродефектов (микротрещины, риски и др.) и формирование в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия. Подтверждением этого являются следующие факты. Остаточные напряжения сжатия в сочетании с наклёпом, созданным при обкатывании шаром, повышают на 30...60% сопротивление усталостному изнашиванию при трении качения деталей. Более того, обкатывание галтелей ступенчатых валов, например коленчатых, является единственным радикальным технологическим мероприятием повышения усталостной прочности деталей, работающих в условиях знакопеременного нагружения.

Доля деформационного упрочнения и остаточных напряжений в увеличении предела выносливости различна и зависит как от механических свойств материала детали, так и от её конструктивных особенностей.

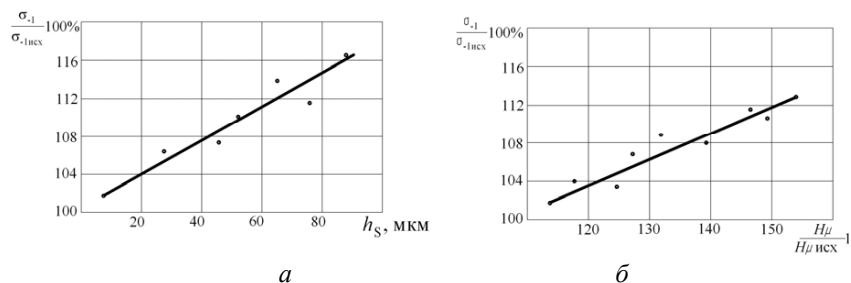


Рис. 3.14. Влияние глубины наклёпа (а) и степени наклёпа (б)

на относительную величину предела выносливости

В повышении усталостной прочности пластичных сталей главную роль играет упрочнение. В этом случае предел выносливости может возрасти на 15...40% (рис. 3.14). Из графиков видно, что при увеличении глубины наклёпанного слоя  $h_s$  и степени наклёпа  $H_{\mu} / H_{\mu \text{исх}}$  предел выносливости возрастает до 20% в каждом случае.

Благоприятное влияние наклёпа объясняется созданием упрочнённого поверхностного слоя металла, затрудняющего возникновение и развитие усталостных микротрещин.

У упрочнённых обкатыванием деталей при работе в условиях знакопеременного нагружения усталостная трещина зарождается под упрочнённым слоем, где напряжения от внешних сил ещё достаточно высоки, а остаточные напряжения сжатия равны нулю или меняют знак. Кроме того, в этом месте прочностные свойства металла значительно ниже, чем в поверхностном слое (рис. 3.15). Из очага разрушения трещина развивается по двум направлениям с различной скоростью. В сторону неупрочнённого материала она развивается с большей скоростью  $v_2$ , чем в упрочнённой зоне  $v_1$ . Упрочнённый слой является как бы «каркасом», сдерживающим продвижение трещины. При этом развитие трещины за счет наклёпа тормозится не только в упрочнённом слое, но и в неупрочнённой части сечения детали, так как сердцевина не имеет контакта с окружающей средой, т. е. усталостное разрушение происходит как бы в условиях вакуума, что существенно снижает интенсивность изнашивания.

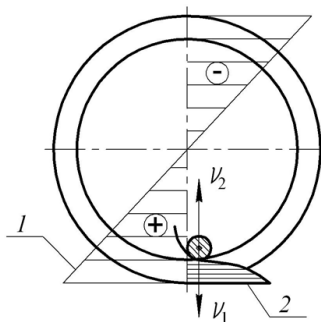


Рис. 3.15. Схема, поясняющая область зарождения усталостной трещины: 1 – напряжения от внешней нагрузки; 2 – остаточные напряжения

С учетом вероятного места зарождения усталостной трещины назначаются режимы обработки поверхностным пластическим деформированием, параметры которой позволяют наиболее эффективно оказывать сопротивление усталости в каждом конкретном случае. Когда разрушение детали начинается на некотором расстоянии от поверхнос-



ти, т. е. в глубине поверхностного слоя, то для увеличения усталостной прочности имеет большое значение глубина упрочненного слоя  $h_s$ . Если разрушение детали начинается непосредственно на её поверхности, то решающее влияние оказывает интенсивность наклёпа  $u_{сп}$ .

Повышение усталостной прочности путем поверхностного упрочнения во многом обусловлено структурным состоянием детали. Связано это с различной способностью структур металла к упрочнению. Поэтому наибольшей усталостной прочностью обладает структура мартенсита, наименьшей – структура сорбита.

Однако наклёп поверхностного слоя оказывает различное влияние на усталостную прочность в зависимости от температуры эксплуатации детали. При небольших температурах нагрева, например в условиях работы компрессора, усталостная прочность повышается с увеличением наклёпа. Однако при высоких температурах нагрева, характерных, например, для цилиндропоршневой группы, наклёп поверхностного слоя нежелателен, так как он снижает усталостную прочность, а также сопротивление металла термической усталости. Объясняется это тем, что при высоких температурах атомы металла, находящиеся в деформированном слое, быстрее перемещаются (диффузируют), чем атомы недеформированного металла. Диффузионная подвижность атомов приводит к разупрочнению поверхностного слоя вследствие выгорания легирующих элементов и усиления окислительных процессов на поверхности при эксплуатации. В этой связи рекомендуется предельное уменьшение глубины упрочненного слоя для деталей, работающих длительное время при высоких температурах и при воздействии остаточных напряжений растяжения.

Усталостная прочность наклёпанных образцов начинает уменьшаться при рабочей температуре, превышающей порог жаростойкости материала ( $t = 650^\circ\text{C}$ ). Поэтому при работе в условиях повышенных температур остаточные напряжения оказывают большее по сравнению с наклёпом влияние на усталостную прочность.

Остаточные напряжения оказывают влияние на усталостную прочность тем больше, чем выше коэффициент неравнопрочности  $\eta$  сталей. Поскольку этот коэффициент неодинаков для различных материалов, то и влияние остаточных напряжений также будет различным. Например, с увеличением хрупкости металла влияние остаточных напряжений воз-

растает. Кроме того, они являются ответственными за увеличение предела выносливости  $\sigma_{-1}$  деталей при наличии конструктивных концентраторов напряжений, таких как шпоночные пазы, галтели и др.

При циклическом нагружении значительного макропластического течения материала не происходит и остаточные напряжения, постепенно уменьшаясь (поскольку в условиях циклического нагружения при любой температуре остаточные напряжения релаксируют), будут действовать на протяжении всего срока службы детали. При этом остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое повышают предел выносливости, а растяжения, наоборот, понижают предел выносливости:

$$\sigma_{-1} - \sigma_{-1\text{исх}} = k\sigma_{\text{ост}}, \quad (3.4)$$

где  $\sigma_{-1\text{исх}}$  — предел выносливости без остаточных напряжений;  $\sigma_{\text{ост}}$  — величина остаточных напряжений;  $k$  — коэффициент, зависящий от материала.

Рассмотрим влияние остаточных напряжений на усталостную прочность на конкретном примере. При вращении вала, в теле которого отсутствуют остаточные напряжения, имеет место симметричный цикл изменения напряжений (рис. 3.16). Если в поверхностном слое вала имеются остаточные напряжения, то они в пределах упругих деформаций будут накладываться на напряжения от внешней нагрузки. В результате возникает несимметричный цикл изменения напряжений, среднее напряжение которого равно по величине и знаку остаточным напряжениям. На диаграмме (рис. 3.16) показано изменение напряжений при наличии в поверхностном слое детали остаточных напряжений растяжения; видно, что время действия и уровень напряжений растяжения значительно превосходят время действия и уровень напряжений сжатия. В этом случае поверхностный слой детали в основном работает на растяжение. Если учесть, что у большинства металлов механические показатели при сжатии выше, чем при растяжении, то деталь, у которой в поверхностном слое образовались остаточные напряжения растяжения, находится в весьма невыгодных условиях в процессе эксплуатации. Кроме того, значения максимальных остаточных напряжений растяжения, возникающих после операции шлифования, часто превосходят предел текучести материала. Это приводит к появлению микротрещин, которые в дальнейшем служат

концентраторами напряжений. Необходимо отметить, что с ростом твёрдости металла происходит увеличение различия механических свойств материала при растяжении и сжатии и, как следствие, возрастает роль остаточных напряжений в повышении усталостной прочности.

Таким образом, формирование остаточных напряжений сжатия на этапе финишной обработки является предпосылкой повышения предела выносливости для большинства материалов.

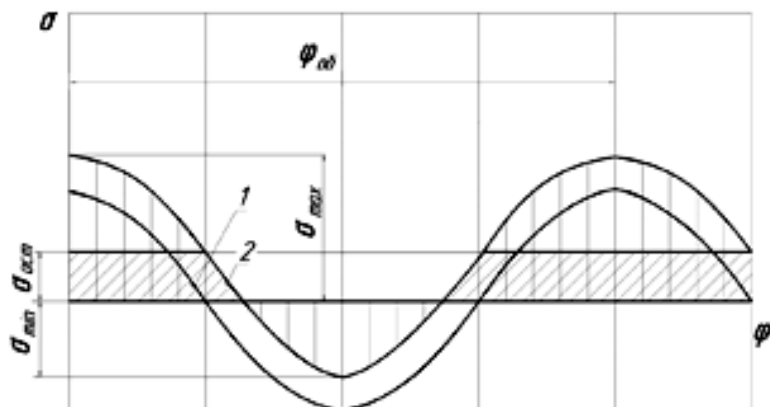


Рис. 3.16. Диаграмма изменения напряжений в поверхностном слое при знакопеременном нагружении: 1 – симметричный цикл; 2 – несимметричный цикл

### Контрольные вопросы

1. Что такое питтинг?
2. При каких условиях эксплуатации возникает излом детали?
3. Какой параметр характеризует усталостную прочность при знакопеременном нагружении?
4. Какие факторы оказывают влияние на усталостную прочность детали?
5. В каком случае наклеп оказывает отрицательное влияние на усталостную прочность детали?

### 3.3. Влияние параметров поверхностного слоя на контактную жёсткость

Контактная жесткость является одной из важнейших эксплуатационных характеристик, определяющих долговечность деталей, входящих в соединения с зазором или натягом, таких как плунжерные и золотниковые пары гидравлических насосов, дорожки качения роликовых опор, ролик и цапфа крестовины, вал и ступица и т. п. Она во многом определяет качество сборки деталей. Контактная жесткость обуславливает сохранение в процессе работы расчетных значений зазоров и натягов и таким образом влияет на характер и интенсивность изнашивания контактных поверхностей.

*Контактная жесткость* – это способность контактных поверхностей сопротивляться действию деформирующих сил. Сближение под нагрузкой поверхностей, возникающее вследствие деформации микронеровностей, в большинстве случаев используют в качестве характеристики контактной жесткости. Она обусловлена как физико-механическими свойствами материала поверхностного слоя, так и геометрическими параметрами поверхностей сопряженных деталей, которые формируются в ходе технологического процесса восстановления изделий, особенно на финишных операциях.

От метода финишной обработки деталей зависят относительная опорная длина микропрофиля рабочей поверхности, шаг микропрофиля, радиус закругления вершин неровностей, взаимное направление следов обработки в соединении, поверхностная твердость и остаточные напряжения в поверхностном слое изделий.

Реальные детали имеют шероховатую поверхность, во многих случаях волнистую и с погрешностями геометрической формы, что приводит к дискретному характеру контакта в соединениях. В результате фактическая площадь касания сопряженных поверхностей составляет незначительную часть ее номинального значения. При любых, даже незначительных нагрузках, напряжения на от-

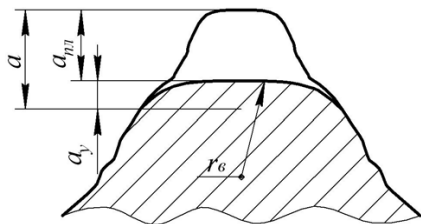


Рис. 3.17. Схема деформации отдельной микронеровности

дельных микронеровностях достигают величины, которая вызывает их пластическую деформацию (рис. 3.17).

Величина деформации  $a$  микронеровностей, которая в общем случае представляет сумму упругой  $a_y$  и пластической  $a_{пл}$  составляющих, зависит от относительной опорной длины профиля. Стремление увеличить опорную длину профиля за счет снижения шероховатости путем обработки поверхности шлифованием абразивными кругами приводит к недостаточному увеличению контактной жесткости, поскольку ее помимо высоты микронеровностей определяет также их форма. Сформированные шлифованием микронеровности обладают малыми радиусами закругления вершин и большими углами наклона сторон элементов профиля  $\beta$ , а значит, такая поверхность характеризуется недостаточной несущей способностью. Контактная жесткость несколько увеличивается при шлифовании кругами из синтетических сверхтвердых материалов, так как увеличиваются радиусы закругления и уменьшаются углы наклона  $\beta$ . Еще большее увеличение контактной жесткости происходит после алмазного выглаживания и обкатывания, формирующих плавный рельеф с большой опорной длиной поверхности.

Упрочнение снижает контактные деформации поверхностей тем больше, чем выше твердость материала (рис. 3.18). Происходит это главным образом за счет уменьшения доли пластической составляющей в общей деформации. Это снижение обусловлено как непосредственным изменением твердости поверхности, так и изменением способности материала к упрочнению.

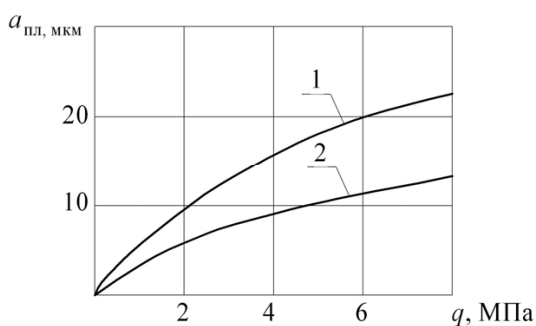


Рис. 3.18. Зависимость деформации микронеровностей от удельного давления в контакте: 1 — ненаклёпанного образца; 2 — наклёпанного образца

Остаточные напряжения в поверхностном слое также оказывают определенное влияние на контактную жесткость. Известно, что остаточные напряжения сжатия увеличивают контактную жесткость, а следовательно, и прочность соединений с натягом. Происходит это за счет увеличения плотности стыка, которое обусловлено процессом «приспосабливания» микрогеометрии поверхностей сопряженных деталей. Процесс «приспосабливания» представляет собой затекание металла одной из контактных поверхностей во впадины на другой поверхности. Процесс приспособливания обусловлен главным образом действием остаточных напряжений сжатия, а его длительность сокращается с увеличением температуры. Следует отметить, что остаточные напряжения сжатия также увеличивают сопротивление поверхности пластическому деформированию в процессе трения качения, а напряжения растяжения, наоборот, снижают сопротивление.

При высоких требованиях к контактной жесткости очевидна необходимость формирования того или иного уровня и знака остаточных напряжений. Однако главная трудность при установлении влияния собственно остаточных напряжений на контактную жесткость заключается в способе формирования различных по величине и знаку остаточных напряжений в поверхностном слое детали. Обычно это достигается механической обработкой различными технологическими методами при разных режимах. Но в этом случае у деталей наряду с формированием различного уровня остаточных напряжений происходит изменение микрорельефа поверхности, ее структуры и твердости, которые оказывают свое различное влияние на конечный результат. Для того чтобы устранить влияние указанных факторов и определить роль собственно напряжений, можно создавать напряжения запрессовкой в области упругой деформации деталей. Так, запрессовка вставки 1 в обойму 2 (рис. 3.19) с разным натягом  $\Delta$  позволяет получить различный уровень напряжений, сохраняя при этом неизменными шероховатость поверхности, структуру и твердость материала деталей в прессовом соединении. При запрессовке возникают напряжения сжатия во вставке 1 и растяжения — в обойме 2.

Контактная жесткость определяется по ширине остаточного отпечатка  $b$ , оставленного индентором 3 в виде ролика на напряженной поверхности обоймы и вставки (рис. 3.20). Результаты измерений ши-

рины отпечатка показали, что деформация растяжения (в радиальном направлении) от воздействия ролика увеличивается с возрастанием уровня напряжений растяжения (кривая 1) и уменьшается с возрастанием уровня напряжений сжатия (кривая 2).

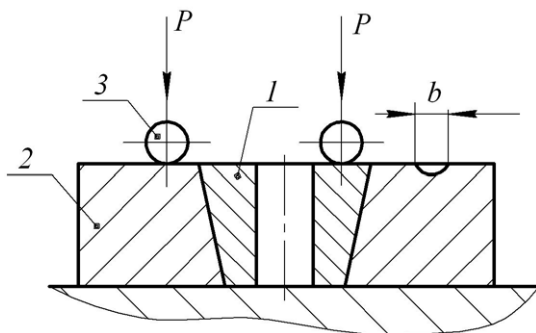


Рис. 3.19. Схема нанесения отпечатка на напряжённую поверхность:  
1 – вставка; 2 – обойма; 3 – индентор

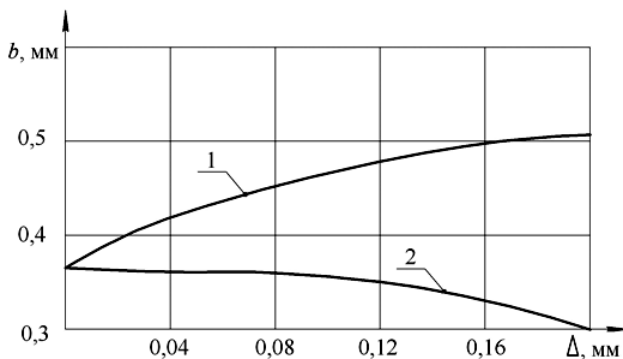


Рис. 3.20. Ширина остаточного отпечатка  $b$  в зависимости от предварительных напряжений, заданных натягом  $\Delta$ :  
1 – обойма; 2 – вставка

В общем случае влияние остаточных напряжений на контактную жесткость усиливается или, наоборот, ослабляется за счёт действия других параметров поверхностного слоя (наклёпа, особенностей структуры и т. п.).

### Контрольные вопросы

1. Какой критерий используется для оценки контактной жесткости деталей?
2. Какие факторы оказывают влияние на контактную жесткость деталей?
3. Какое влияние на контактную жесткость деталей оказывает упрочнение материала?
4. Какое влияние на контактную жесткость деталей оказывают остаточные напряжения?
5. Что представляет собой явление приспособления микрогеометрии сопряженных поверхностей?

### **3.4. Влияние параметров поверхностного слоя на статическую прочность соединений с натягом и на фреттингстойкость контактных поверхностей**

В процессе эксплуатации соединений с натягом при переменных режимах нагружения возникают значительные касательные контактные деформации. Например, соединение ролик – цапфа крестовины карданной передачи автомобиля испытывает в процессе работы действие нескольких сил. Определяющими являются крутящий момент, осевые и радиальные усилия. Кроме того, на него действуют динамические нагрузки, вызываемые неустойчивыми режимами в работе. Натяг в прессовой посадке в зависимости от номинального размера составляет от 50 до 90 мкм.

Циклические режимы нагружения и изменение крутящего момента вызывают вибрации, которые обуславливают появление в контакте сопряженных деталей осциллирующих возвратно-вращательных микросмещений с амплитудой до 0,025 мм. Вибрации ухудшают антифрикционные характеристики контактных поверхностей и приводят к увеличению коэффициента трения до значений, превышающих порог внешнего трения. В результате этого в контакте развивается фреттинг-коррозия. Этому виду изнашивания подвержены прессовые, фланцевые соединения, штуцера, уплотнения, муфты и т. п.

*Фреттинг-коррозия* – это разновидность фреттинга, при которой преобладает химическая реакция, т. е. в условиях осциллирующих



микроремещений на контактных поверхностях происходит периодическое образование и разрушение твердых окисных плёнок, которые после разрушения становятся абразивом, приводящим к ещё более интенсивному фреттинг-износу (разновидность абразивного изнашивания) посадочных поверхностей. Разрушения от фреттинг-коррозии проявляются в виде натиров, вырывов, раковин размером в несколько десятков микрометров (рис. 3.21), заполненных порошкообразными продуктами изнашивания, которые имеют характерный красно-коричневый цвет. При этом необходимо отметить, что продукты фреттинг-коррозии практически не имеют возможности для выхода из зоны образования вследствие того, что посадочные поверхности никогда не выводятся из контакта. Кроме того, удельный объем окисных пленок больше удельного объема чистого металла, из которого они образовались. Это обстоятельство приводит к увеличению контактного давления в соединении и, соответственно, интенсивности изнашивания контактных поверхностей.



Рис. 3.21. Фреттинг-коррозия цапф крестовины

Износ контактных поверхностей, происходящий в результате фреттинг-коррозии, приводит к потере статической прочности соединения с натягом, которая выражается в относительном смещении сопряжённых деталей.

Также фреттинг-коррозия сопровождается развитием усталостных трещин. Развитие трещины на поверхности детали происходит перпендикулярно направлению фреттинга. Появлению усталостных трещин способствует концентрация напряжений от посадки (рис. 3.22). Контактные давления в прессовом соединении независимо от метода обработки поверхности достигают своего максимального значения по краям сопряжения (кривая 1). И, как показывает практика, именно эти места подвержены усталостным изломам.

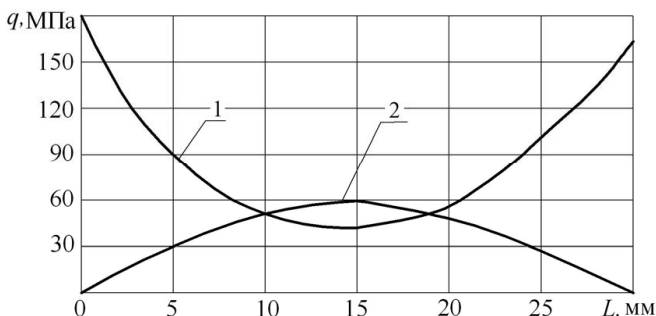


Рис. 3.22. Распределение контактных давлений по длине соединения с натягом: 1 – цилиндрической поверхности после токарной обработки; 2 – бочкообразной поверхности после нанесения регулярного микрорельефа выглаживанием

Фреттинг-коррозия обусловлена тремя базовыми процессами.

1. Механическое взаимодействие контактных поверхностей, которое приводит к разрушению окисных плёнок на поверхности. В результате вскрывается чистый металл, который быстро окисляется в течение первой половины цикла микроперемещения после вскрытия. При возвратной половине цикла окисные плёнки разрушаются вновь.

2. Микрошлифование, которое представляет собой механическое взаимодействие контактных поверхностей в условиях осциллирующих микросмещений. Микрошлифование приводит к удалению в тонко размельчённой форме металлических частиц с поверхностей деталей, составляющих сопряжение.

3. Накопление продуктов разрушения (абразива) в зоне контакта, которые существенным образом ускоряют изнашивание контактных поверхностей.

Указанные процессы приводят к уменьшению натяга и, как следствие, преждевременному разрушению соединения. В этой связи возникает необходимость повышения фреттингстойкости контактных поверхностей.

*Фреттингстойкостью* называется способность контактных поверхностей сопротивляться разрушению при малых колебательных относительных перемещениях в условиях агрессивной среды.

Необходимо отметить некоторые факторы, от которых зависит фреттингстойкость контактных поверхностей.

1. Повреждения от фреттинг-коррозии уменьшаются в вакууме или инертной среде.

2. Продукты разрушения, образующиеся при фреттинг-коррозии, представляют собой твёрдые химические соединения, главным образом  $Fe_2O_3$ .

3. Интенсивность фреттинг-коррозии возрастает с уменьшением частоты и увеличением амплитуды относительных колебаний поверхностей. Это объясняется тем, что толщина окисных пленок увеличивается с ростом продолжительности процесса окисления металла. Продолжительность окисления, а следовательно, объем продуктов изнашивания возрастают с уменьшением частоты и увеличением амплитуды относительных колебаний поверхностей.

4. Интенсивность фреттинг-коррозии увеличивается с возрастанием контактной нагрузки в сопряжении.

5. Интенсивность фреттинг-коррозии снижается с увеличением поверхностной твёрдости и уровня остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое.

Надёжность и долговечность соединений с натягом во многом зависят от статической прочности соединений и фреттингстойкости контактных поверхностей, которая тесно связана с другими эксплуатационными свойствами, такими как износостойкость, контактная жёсткость и усталостная прочность.

В настоящее время существуют следующие методы повышения фреттингстойкости контактных поверхностей.

#### 1. Конструктивные методы:

- предотвращение (или уменьшение количества) относительных перемещений контактных поверхностей;
- перенос относительного движения в промежуточную среду, в качестве которой используют, например, промежуточные слои полимеров;
- повышение конструкционного демпфирования стыка контактных поверхностей, т. е. обеспечение повышенной контактной податливости сопряжений.

#### 2. Технологические методы:

- уменьшение коэффициента трения;
- предотвращение схватывания путем подбора металлов с низкой

- склонностью к схватыванию;
- повышение твердости контактных поверхностей, которая снижает интенсивность абразивного изнашивания.

Очевидно, что фреттингстойкость контактных поверхностей и статическая прочность соединений с натягом будут возрастать при увеличении плотности стыка и фактической площади контакта, так как это снижает относительные перемещения сопряженных поверхностей. Плотность стыка будет увеличиваться при нанесении идентичных рельефов (при равных высотно-шаговых параметрах рельефов) на контактных поверхностях, а также при инициировании процесса приспособляемости микрогеометрии посадочных поверхностей. Получение контактных поверхностей с равными высотно-шаговыми параметрами шероховатости дает возможность создания при поперечной сборке (с нагревом охватываемой детали и охлаждением охватываемой детали) соединения по типу резбового. Такой характер контактирования поверхностей деталей существенным образом повышает статическую прочность посадки.

Так как требуемые показатели качества поверхности, в частности регулярный микрорельеф и остаточные напряжения сжатия, окончательно формируются на последних операциях технологического процесса восстановления, то финишная обработка оказывает решающее влияние на фреттингстойкость контактных поверхностей и статическую прочность соединений с натягом.

Анализ типовой технологии механической обработки восстанавливаемых деталей, образующих соединение с натягом, которая включает растачивание втулки (охватываемой детали) до получения шероховатости  $R_a = 1,25 \dots 1,5$  мкм и шлифования вала (охватываемой детали) до получения шероховатости  $R_a = 0,6 \dots 0,8$  мкм, показывает, что при такой обработке не достигается равенство высотно-шаговых параметров микрорельефа контактных поверхностей (рис. 3.23) и, как правило, не происходит

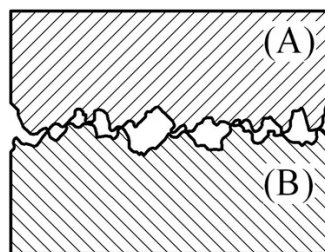


Рис. 3.23. Характер контакта сопряженных поверхностей в соединении с натягом

образование остаточных напряжений сжатия.

В тех случаях, когда на финишных операциях, предшествующих запрессовке, в поверхностном слое отверстий охватывающих деталей формировались остаточные напряжения сжатия, прочность соединений увеличивалась в среднем на 30%. Так происходило после дорнования втулки с натягом 0,13 мм. Несмотря на то что при уменьшении высоты микропрофиля поверхности охватывающей детали до  $R_a = 1,0-1,25$  мкм так и не было получено равных высотно-шаговых параметров шероховатости сопрягаемых поверхностей, прочность соединений увеличивалась. Очевидно, что это происходило за счет образовавшихся остаточных напряжений сжатия.

Сформировать одновременно синхронные регулярные микро рельефы и остаточные напряжения сжатия на контактных поверхностях можно алмазным выглаживанием или электромеханической обработкой (см. раздел 4.1.2).

Усилие распрессовки, которое может характеризовать статическую прочность соединений с натягом, возрастает при образовании на контактных поверхностях синхронных регулярных микро рельефов (рис. 3.24). Повышение статической прочности соединения

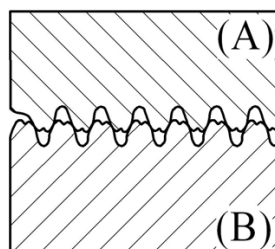


Рис. 3.24. Схема контакта поверхностей с синхронным микропрофилем

с натягом объясняется не только увеличением натяга вследствие образования наплывов, но и возрастанием фактической площади контакта как за счёт равенства высотно-шаговых параметров шероховатости, так и за счёт упругопластического оттеснения материала вершин микровыступов во впадины микропрофиля сопряженной поверхности вследствие проходящего процесса приспособливания микрогеометрии (рис. 3.25).

При запрессовке деталей с маслом наблюдается общее снижение коэффициента трения в сопряжении и отмечается резкое увеличение усилий распрессовки. Это связано с проявлением эффекта гидрозапора масла в замкнутых масляных карманах при сборке соединения. Синхронные регулярные рельефы являются радикальным средством снижения анизотропии коэффициентов трения в продольном и по-

перечном направлениях и усиления несущей способности прессовых соединений, работающих на сдвиг и кручение. При этом необходимо отметить, что эффективность регулярных микрорельефов возрастает с увеличением длины соединения (рис. 3.26).

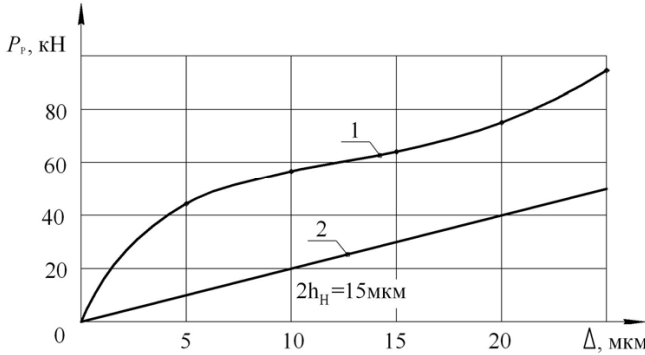


Рис. 3.25. График зависимости усилия распрессовки  $P_p$  от величины натяга  $\Delta$  сопряженных поверхностей: 1 — с синхронным микрорельефом; 2 — с произвольным микрорельефом

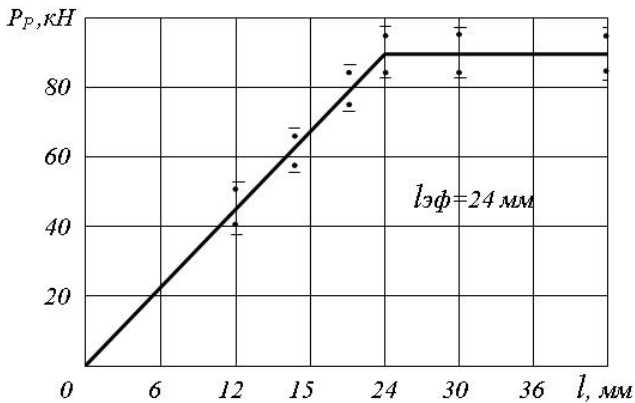


Рис. 3.26. Зависимость усилия распрессовки  $P_p$  соединения с натягом 25 мкм с синхронным микрорельефом на валу и втулке от длины  $l$  посадки

Применение синхронных рельефов может быть использовано для предотвращения самораспрессовки соединений, работающих при циклическом изгибе.

Недостатком прессовых соединений с синхронным регулярным рельефом является одноразовое их использование из-за невозможности переборки, так как при распрессовке происходят срез и деформация находящихся друг между другом неровностей.

Формирование регулярного микрорельефа является эффективным технологическим мероприятием повышения фреттингстойкости контактных поверхностей главным образом вследствие попадания продуктов фреттинг-коррозии во впадины рельефа, которое приводит к локализации их разрушающих воздействий.

Регулярный рельеф с большими радиусами закругления впадин способствует увеличению усталостной прочности деталей. Также повышает усталостную прочность (и в целом фреттингстойкость) контактная податливость стыка и искусственно созданная за счет рельефа бочкообразность на одной из посадочных поверхностей вследствие снижения и выравнивания напряжений от посадки (см. рис. 3.22).

При создании пластическим деформированием регулярного микрорельефа поверхности повышаются твердость и прочность материала поверхностного слоя, образуются остаточные напряжения сжатия. Все эти факторы препятствуют развитию фреттинг-коррозии. Образованный пластически деформированный слой затрудняет проникновение поверхностно-активных веществ внутрь металла. Также необходимо отметить важный факт, что получение твердости с максимумом на поверхности и плавным снижением её к пластичной сердцевине способствует повышению вибропрочности соединений, особенно при работе на изгиб и кручение.

Нанесение регулярного микрорельефа позволяет существенно увеличить ресурс соединений с натягом путем одновременного повышения статической прочности соединений и фреттингстойкости контактных поверхностей. Так, ресурс крестовины заднего моста автомобилей «Жигули» за счет нанесения регулярного микрорельефа на поверхность цапфы повысился с 60...80 тыс. км до 160 тыс. км пробега.

#### *Контрольные вопросы*

1. При каких условиях эксплуатации деталей происходит развитие фреттинг-коррозии?
2. Какие дефекты деталей образуются в результате фреттинг-коррозии?
3. Какими базовыми процессами обусловлена фреттинг-коррозия?

4. Какие факторы оказывают влияние на интенсивность фреттинг-коррозии?
5. Какие методы применяются для повышения фреттингстойкости контактных поверхностей?
6. Какой показатель характеризует статическую прочность соединений с натягом?

### **3.5. Влияние параметров поверхностного слоя на коррозионную стойкость**

*Коррозия* – результат химического или электрохимического взаимодействия металла поверхностного слоя деталей с агрессивной средой. Коррозионной стойкостью называется способность материала сопротивляться коррозионным разрушениям при действии агрессивной среды.

Коррозия не только портит внешний вид поверхностей изделий, но и снижает механические свойства металлов (рис. 3.27). Причиной возникновения коррозии является термодинамическая неустойчивость металлов, возникающая в процессе сильного механического или термического воздействия на деталь, например в процессе обработки. Все металлы и сплавы в условиях эксплуатации стремятся перейти в более устойчивое окисленное (ионное) состояние. Физико-химическая сущность процесса коррозии заключается в самопроизвольном переходе металла из неустойчивого в устойчивое состояние.





Рис. 3.27. Вид коррозионных повреждений кузова автомобиля

Интенсивность и характер коррозионного процесса всегда обусловлены рядом факторов, которые делятся на внешние и внутренние.

К внешним факторам относятся химический состав среды, в которой эксплуатируется деталь, температура в рабочей зоне и скорость движения среды.

Эксплуатация автомобильного транспорта происходит в условиях высоких скоростей при наличии агрессивной среды, перепада температур и действия больших механических нагрузок, которые способствуют развитию коррозионных процессов.

К внутренним факторам относятся: химический состав металлов и параметры поверхностей деталей, такие как шероховатость, структура, твердость и остаточные напряжения, которые обусловлены способами обработки.

Коррозионная стойкость деталей в зависимости от вида коррозии оценивается либо уменьшением веса металла с единицы площади либо уменьшением линейных размеров за единицу времени.

Коррозия происходит под действием химически агрессивных сред: воздуха, воды, органических и неорганических кислот и др. Различают два основных вида коррозии – химическую и электрохимическую. В свою очередь, в зависимости от условий эксплуатации и состава внешней среды химическая коррозия может быть атмосферной и газовой. При атмосферной коррозии, которая происходит при

нормальном давлении и температуре ниже 80°C, поверхности деталей покрываются слоем окислов, образующихся в результате химического взаимодействия металла с компонентами окружающей среды (преимущественно с кислородом). Окисный слой в большинстве случаев не обладает необходимыми защитными свойствами, т. е. не изолирует поверхность от агрессивной среды.

Важнейшими конструкционными материалами для изготовления большинства деталей машин по-прежнему являются углеродистые и низколегированные стали. Эти стали имеют большое сродство к кислороду и поэтому подвержены интенсивному коррозионному разрушению.

Шероховатость поверхности также является существенным фактором, определяющим интенсивность коррозии. С увеличением высоты микронеровностей возрастает площадь контакта поверхности детали с окружающей агрессивной средой и, как следствие, возрастает скорость коррозионных разрушений. Кроме того, ускорению коррозионных процессов способствуют малые радиусы закругления впадин микропрофиля, являющиеся энергоёмкими местами (концентраторами напряжений), в которых в первую очередь зарождаются очаги коррозии. На полированной поверхности таких энергоёмких мест мало, поэтому она в меньшей степени подвержена коррозии. Наоборот, после пескоструйной, дробеструйной, химической или механической обработки поверхности деталей имеют большую склонность к коррозии.

Наклеп оказывает неоднозначное влияние на коррозионную стойкость. Известно, что в результате деформационного упрочнения коррозионная стойкость резко снижается. Например, поврежденный при соударении в дорожно-транспортном происшествии участок кузова автомобиля подвергается интенсивной коррозии. Происходит это из-за того, что после холодной пластической деформации мягкая сталь может поглощать на порядок больше кислорода, чем отожжённая сталь. Однако также имеет место повышение коррозионной стойкости при обкатывании деталей, которое происходит вследствие создания наклепанного поверхностного слоя материала с более положительным электродным потенциалом по сравнению с основным металлом. Этому способствует и высокая термодинамическая устойчивость материала наклепанного слоя, возникающая вследствие образования мелкоблочной и высокодисперсной структуры. Очевидно,

что такое противоречивое влияние наклёпа на коррозионную стойкость можно объяснить, во-первых, материалом детали, а во-вторых, методом повышения поверхностной твёрдости. Так, при упрочнении поверхностного слоя обкатыванием происходит завальцовывание поверхностных микродефектов, которые являются путями проникновения агрессивных сред внутрь металла. Кроме того, упрочнение методами поверхностного пластического деформирования увеличивает диффузию кислорода воздуха в металле поверхностного слоя, образуя в нём твёрдые химические соединения  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $FeO_4$ , которые обладают защитными свойствами.

Газовая коррозия является частным случаем химической коррозии и происходит в результате воздействия газов и паров на поверхность металла при высокой температуре (особенно при температуре выше  $300^\circ\text{C}$ ). В качестве агрессивных компонентов газовой среды могут выступать химические соединения серы, хлора, азота и, конечно же, кислорода. Скорость коррозии возрастает с увеличением содержания в газовой среде агрессивных примесей (например, углекислого газа, двуокиси серы и др.). Образующиеся продукты коррозии создают на поверхности деталей пленку, которая на какое-то время защищает металл от воздействия агрессивной среды и снижает интенсивность коррозионных процессов. Защитные свойства пленок зависят от их сплошности, толщины и прочности сцепления с металлом. Большей защитной способностью обладают тонкие пленки, вследствие их меньшей хрупкости. С повышением параметров процесса газовой коррозии, таких как температура, давление и скорость движения газовой среды, защитные свойства пленок в большинстве случаев снижаются.

Значительное влияние на скорость коррозии углеродистых и низколегированных сталей оказывает соотношение окиси углерода  $CO$  и углекислого газа  $CO_2$  в выхлопных газах. С увеличением содержания  $CO$  скорость коррозии снижается, а при концентрации 14...18% коррозия может прекратиться совсем. Примером газовой коррозии являются разрушения на фасках тарелок выпускных клапанов, выпускного тракта автомобильного двигателя и в глушителе, которые происходят под воздействием отработавших газов.

Процесс электрохимической коррозии может происходить только при наличии макро- и микрогальванических элементов. На поверх-

ности металлических изделий, находящихся в атмосфере, образуется тонкая пленка воды, так называемый конденсат. Толщина такой пленки может быть различной в зависимости от температуры и влажности окружающей среды. Газы, присутствующие в воздухе, растворяются в этой пленке, создавая электропроводную среду (электролит). Электролит — это водный раствор солей, щелочей, кислот. Так естественным образом формируются условия для электрохимической коррозии.

Известно, что у каждого металла при попадании в электролит возникает электродный потенциал. А при контакте двух разных металлов в жидкой электропроводной среде за счёт возникновения разности электродных потенциалов возникает гальваническая пара и металл с более отрицательным электродным потенциалом (анод) начинает растворяться.

Достаточно часто на металлической поверхности возникают короткозамкнутые микрогальванические элементы, образованные различными структурными составляющими сплава, из которого изготовлена деталь. Анодом и катодом также могут служить граница и сердцевина зерна, чистый металл и его окислы, деформированные и недеформированные участки металла, имеющие разные электродные потенциалы. При наличии электролита на катодных участках идет восстановление окислителей, а на анодных участках — растворение металла.

В начальной стадии коррозия имеет точечный характер, затем распространяется на всю поверхность изделия. Наряду с образованием многочисленных гальванических микропар имеет место образование макропар между сопряженными деталями из разных металлов. В условиях электрохимической коррозии прежде всего разрушаются выступы неровностей на поверхности металла, который является анодом.

Необходимо отметить важный факт: скорость разрушения материала при электрохимической коррозии значительно выше, чем при химической.

Коррозионные повреждения кузова автомобиля можно рассматривать как совместный результат действия химической и электрохимической коррозии. При этом коррозионные повреждения проявляются:

- в нарушении товарного вида автомобиля, происходящем в результате действия подслоной коррозии и выражающемся во вспучивании и шелушении лакокрасочного покрытия;
- в изменении геометрии кузова и деформации дверных проемов, воз-

- никающих вследствие локальных разрушений в усилителях, лонжеронах, местах соединений деталей пола, порогах, крыльях и др.;
- в уменьшении прочности креплений узлов и агрегатов автомобиля;
  - в ухудшении общего физического состояния металлических деталей.

Наиболее сильные коррозионные повреждения кузова происходят при эксплуатации автомобиля в зимнее время года. Этому во многом способствует обработка дорожного покрытия солью, песком и различными противогололедными реагентами, попадающими на элементы кузова и вызывающими электрохимическую коррозию. Большую роль в развитии коррозионных процессов играет изменение температуры элементов кузова в течение суток, особенно если автомобиль днем эксплуатируется в условиях отрицательных температур окружающей среды, а ночью находится в тёплом гараже при положительных температурах. Во-первых, повышение температуры электролита, образовавшегося из соляных составов, ускоряет протекание коррозионных процессов. Во-вторых, снег и лед, попавшие на кузов на улице, тают, и образовавшаяся вода затекает в узкие зазоры, щели и трещины лакокрасочного покрытия. Когда же автомобиль выезжает на морозную улицу, вода в щелях и трещинах замерзает и в силу расклинивающего действия раздвигает их, вскрывая лакокрасочное покрытие кузова.

Для сплавов на основе железа распространенным и опасным видом локальной коррозии является щелевая коррозия, которая возникает при разности  $pH$ -среды в различных щелях, узких зазорах, под всевозможными прокладками и наростами. Этому виду коррозии достаточно сильно подвержены участки металла, контактирующие с неметаллическими материалами, такими как древесина, стекло, пластик, бетон, ткани и др.

Структура в многофазных сплавах, фазы которых являются электрохимически гетерогенными (неоднородными), является одной из причин межкристаллитной коррозии. Она обусловлена не только химическим составом, но и неправильной термической обработкой. Например, нарушение режима термообработки коррозионностойких сталей приводит к обогащению границ зёрен (кристаллитов) химическими элементами, из которых состоит сталь. Границы зёрен становятся электрохимически отличными от зёрен металла, что приводит к образованию микрогальванической пары и, как следствие, к их раз-

рушению. Далее коррозия распространяется по межкристаллитным границам в сердцевину детали. В результате происходит разрушение металла на большой глубине без явных коррозионных повреждений на поверхности изделия.

Структурная неоднородность и высокая напряженность металла сварных швов являются причиной ножевой коррозии. В местах сварки ножевая коррозия протекает с высокой скоростью и сопровождается большими повреждениями.

Считается, что остаточные напряжения любого знака как один из главных факторов термодинамической неустойчивости металлов снижают сопротивление коррозии. Однако также известен факт повышения сопротивления коррозионной усталости (при одновременном действии переменных напряжений и коррозионной среды) обкатанных образцов. Повышение обусловлено действием остаточных напряжений сжатия, замедляющих процессы коррозионного растрескивания. Наоборот, остаточные напряжения растяжения способствуют коррозионному растрескиванию (коррозионной статической усталости) в коррозионно-агрессивных средах. Такое достаточно сильное влияние остаточных напряжений на коррозионную усталость можно объяснить тем, что усталостный фактор является превалирующим в процессе разрушения по отношению к коррозионному фактору.

Существует множество способов защиты изделий от коррозии, учитывающих не только особенности самого металла, но и условия его эксплуатации. Поэтому нет какой-либо единой системы выбора и применения мер защиты от коррозии.

Наиболее распространёнными и максимально эффективными являются методы нанесения защитных покрытий — металлических, гальванических, химических, лакокрасочных, эмалевых и др. Роль покрытий как средств защиты от коррозии сводится большей частью к изоляции металла от агрессивной среды. В этой связи к ним предъявляются определенные требования. Они не должны иметь пор, должны быть газо- и водонепроницаемыми, химически стойкими, механически прочными, обладать высокой прочностью сцепления с основным металлом и, следовательно, не должны отслаиваться в процессе эксплуатации.

Одним из эффективных методов повышения коррозионной стойкости является электрохимическая защита. Суть ее заключается

в подключении защищаемой поверхности к катоду постороннего источника постоянного тока с целью создания на ней отрицательного потенциала (катодная защита) или в присоединении металлов с более отрицательным электродным потенциалом (протекторов), благодаря чему анодные участки защищаемой поверхности становятся катодными (протекторная защита).

Для электрохимической защиты применяют анодные покрытия (цинк, кадмий), получаемые электрохимическим способом, которые также имеют более отрицательный электродный потенциал, чем основной металл (железо). Электрохимическая защита кабелей, трубопроводов, свай и др. получила широкое распространение в нефтяной, химической, судостроительной и других отраслях промышленности.

Необходимо отметить, что многие проблемы, связанные с электрохимической коррозией, могут быть решены на стадии проектирования конструкции изделия. Так, при конструировании кузова следует исключить условия длительного контакта элементов кузова с водой. Для этого в нижних точках полостей, куда может попадать вода, должны быть предусмотрены дренажные отверстия. Такими отверстиями снабжены двери автомобиля, площадки кронштейнов для установки аккумуляторных батарей, отсеки для хранения запасного колеса и др. Отверстия должны иметь размеры, достаточные для вытекания воды и удаления мусора при условии возможного их засорения.

Внешняя форма кузова должна обеспечивать быстрое стекание воды даже при сильном дожде. Обводы щелей при закрытом капоте и крышке багажника должны иметь желобки, по которым вода может свободно стекать с кузова, не попадая в моторный отсек и багажник при стоянке автомобиля. Поскольку площадка для стоянки автомобиля не всегда строго горизонтальная, желательно, чтобы конструкция желобков обеспечивала полное стекание воды при наклоне автомобиля в любую сторону по крайней мере на угол  $2...3^\circ$ . Конструкция отверстий для вентиляции кузова (за счет жалюзи, специальных отбортовок или других устройств) должна исключать попадание дождевой воды во внутренние полости кузова как при стоянке автомобиля, так и при его движении.

При конструировании кузова его элементы необходимо выполнять из однородных металлов, что позволит устранить образование макрогальванических пар и протекание электрохимических процессов.

### *Контрольные вопросы*

1. Какова причина возникновения коррозии?
2. Какие факторы оказывают влияние на интенсивность коррозии?
3. Чем отличается атмосферная коррозия от газовой?
4. Почему шероховатость поверхности оказывает большое влияние на коррозионную стойкость деталей?
5. Какие условия необходимы для протекания электрохимической коррозии?
6. Какие методы применяются для повышения коррозионной стойкости деталей?



### **3.6. Влияние параметров поверхностного слоя деталей на интенсивность деформационного изнашивания**

Работоспособность и долговечность деталей машин во многом обусловлены сохранением их точности в процессе эксплуатации. Потеря точности происходит из-за остаточных деформаций, возникающих при деформационном изнашивании. В основе этого вида изнашивания лежит возникновение несимметричных начальных напряжений в период эксплуатации. Деформационному изнашиванию подвержены блоки цилиндров, картеры коробки передач и заднего моста, коленчатые, распределительные валы, шатуны и другие детали.

Существуют две основные причины образования несимметричных начальных напряжений. Они обусловлены прежде всего режимами работы изделия – величиной и характером действующих нагрузок, рабочей температурой, продолжительностью работы, – которые приводят к возникновению градиента напряжений в сечениях детали. Так, стенки блока цилиндров воспринимают горизонтальную (нормальную) составляющую давления сгорающей смеси в цилиндрах двигателя; опоры коренных подшипников испытывают усилия, передаваемые им от коленчатого вала; опоры подшипников в картере коробки передач воспринимают усилия от валов, на которых находятся шестерни, передающие крутящие моменты. Все эти внешние силы, воспринимаемые теми или иными частями базовых чугунных деталей, вызывают их деформацию, приводящую к нарушению правильного взаимного расположения рабочих и присоединительных поверхностей.

В случае, когда напряжения от внешних температурных и силовых полей, алгебраически складываясь с технологическими остаточными напряжениями, превышают предел текучести материала детали, причиной образования несимметричных начальных напряжений является локальная пластическая деформация. Эта деформация вызывает макропластическое течение материала поверхностного слоя. Неравномерная пластическая деформация формирует в теле детали несимметричные начальные напряжения. В результате нарушается существующее равновесие напряженно-деформированного состояния детали. Перераспределение начальных напряжений приводит к образованию остаточных деформаций (изгибу валов и нарушению взаимного расположения поверхностей базовых деталей). При этом

величина остаточных деформаций во многом определяется сформированной в процессе изготовления асимметрией распределения технологических остаточных напряжений в теле детали.

Когда алгебраическая сумма напряжений от внешней нагрузки и технологических остаточных напряжений меньше предела текучести материала, причиной образования несимметричных начальных напряжений является релаксация остаточных напряжений.

Под релаксацией остаточных напряжений понимают процесс снижения напряжений в деталях вследствие перехода термодинамической системы из неустойчивого, неравновесного состояния в состояние термодинамического равновесия. Уровень остаточных напряжений в детали является одним из основных факторов, определяющих интенсивность релаксации напряжений. При этом, казалось бы, с увеличением уровня снимаемых напряжений должна возрасти величина остаточных деформаций. Однако это не всегда так. При равномерной релаксации, когда за сравнительно большой промежуток времени остаточные напряжения снижаются пропорционально их первоначальной величине, уровень снятых напряжений не отражается на изменении взаимного расположения поверхностей деталей. Этот факт можно объяснить тем, что равномерная релаксация напряжений не нарушает характер распределения остаточных напряжений в сечениях детали и, как следствие, не приводит к образованию остаточных деформаций. Потеря точности происходит при неравномерной релаксации, возникающей в результате локального термического и силового воздействия на поверхность детали, а также вследствие различного уровня и знака технологических остаточных напряжений на отдельных участках изделия. Снижение остаточных напряжений с различной скоростью в разных областях детали приводит к нарушению ее напряженного состояния, а вследствие этого – к образованию остаточных деформаций.

Релаксация технологических остаточных напряжений как причина деформационного изнашивания возникает в случае, когда в процессе изготовления не была проведена операция «старения» (снятие остаточных напряжений) после получения отливки. Так, в блоке цилиндров за счет этого происходит значительное смещение опор коренных подшипников, величина несоосности которых может достигать 0,14...0,15 мм при допусковом отклонении по техническим

условиям не более 0,04 мм. В результате протекания релаксационных процессов происходит деформация присоединительной плоскости блока цилиндров, величина которой достигает 0,145 мм, и нарушение параллельности осей коленчатого и распределительного валов. Отклонение межцентрового расстояния последних может колебаться в пределах от +0,42 до -0,39 мм. Аналогичные деформации происходят в коробках передач. Так, имеют место значительные перекосы и непараллельность осей валов, доходящие до 0,5...0,7 мм на длине картера.

Деформационное изнашивание приводит к нагреву и нарушению нормальной работы подшипников и снижению усталостной прочности коленчатого вала под воздействием знакопеременных нагрузок. Кроме того, укладка коленчатого вала на смещенные опоры коренных подшипников является причиной интенсивного износа шеек и поломок коленчатого вала двигателя. Непараллельность осей валов коробки передач, возникающая в процессе эксплуатации, быстро приводит их в негодность вследствие интенсивного изнашивания, а в отдельных случаях — вследствие поломки деталей.

Следует отметить, что для сохранения точности в ряде случаев (например, для деталей типа валов) нежелательно снижать до минимума величину остаточных напряжений при обработке деталей, так как напряжения сжатия увеличивают сопротивление пластической деформации растяжения, повышая таким образом несущую способность поверхностного слоя (см. раздел 3.3). В свою очередь, несущая способность во многом определяет условия нагружения детали в процессе эксплуатации. В случае снижения несущей способности поверхностного слоя возрастают рабочие нагрузки и температура и, как следствие, увеличиваются скорость и неравномерность релаксации остаточных напряжений. Эти процессы инициируют деформационное изнашивание. Поэтому, принимая во внимание, что устойчивость технологических остаточных напряжений зависит от тождественности их знака со знаком напряжений от внешней нагрузки и учитывая взаимосвязь точности с состоянием поверхностного слоя, необходимо уровень и знак остаточных напряжений формировать в зависимости от конкретных условий эксплуатации изделия. Это позволит в процессе эксплуатации уменьшить вероятность возникновения пластической деформации. Кроме того, для снижения интенсивности деформаци-

онного изнашивания требуется повысить релаксационную стойкость материала путем проведения рациональных методов обработки.

Релаксационная стойкость определяется главным образом структурно-фазовым составом и физико-механическими свойствами материала. Устойчивости остаточных напряжений способствуют все факторы, которые повышают прочность материала поверхностного слоя детали. Такими факторами являются уменьшение размеров зерен и частиц дисперсной фазы, увеличение угла их разориентировки, равномерное распределение частиц в объёме поверхностного слоя и др. Релаксационная стойкость также повышается в результате перевода метастабильных фазоструктурных составляющих в устойчивые модификации.

#### *Контрольные вопросы*

1. Почему в процессе эксплуатации деталей возникает деформационное изнашивание?
2. К каким последствиям может привести деформационное изнашивание деталей?
3. В каком случае причиной деформационного изнашивания деталей является локальная пластическая деформация?
4. В каком случае причиной деформационного изнашивания деталей является неравномерная релаксация остаточных напряжений?
5. Какие пути снижения интенсивности деформационного изнашивания деталей вы знаете?

### **3.7. Способы снижения интенсивности изнашивания деталей и узлов автомобиля**

Конструктивные способы обеспечения долговечности рабочих поверхностей деталей сводятся к подбору оптимального сочетания материалов трущихся пар, назначению их размеров и формы, использованию наиболее подходящих к режимам трения смазочных материалов.

Применение смазочных материалов в узлах трения является традиционным способом снижения интенсивности изнашивания деталей машин. Смазочные материалы позволяют в той или иной степени разделить поверхности трения. Основной эффект от действия смазочных материалов выражается в уменьшении коэффициента трения, обеспечении более равномерного распределения давления и температуры

в зоне контакта поверхностей, более интенсивном отводе теплоты из зоны трения, защите рабочих поверхностей от коррозии и др.

Для смазывания узлов трения машин используют различные жидкие, пластичные и твердые нефтяные масла, которые представляют собой сложные смеси парафиновых, ароматических и нафтеновых углеводородов, а также кислород-, серо- и азотсодержащих органических соединений.

Независимо от условий применения и назначения смазочные материалы должны отвечать следующим требованиям:

- надежно выполнять свои функции в широком диапазоне температур, нагрузок, скоростей относительного движения деталей;
- минимально изменять свойства в условиях хранения и эксплуатации;
- не вступать в реакцию с контактирующими материалами;
- иметь хорошие экологические свойства, пожаро- и взрывобезопасность, способность к многократной регенерации или полной утилизации.

При выборе смазочных материалов основное внимание должно уделяться смазывающим и физико-химическим свойствам.

Смазывающие свойства масел обуславливают нормальную работу пар трения, снижая или предупреждая многие виды изнашивания путем уменьшения сил трения. К физико-химическим свойствам относятся вязкость, плотность, вспениваемость, эмульгируемость, коррозионность и др. При этом различают объемные и поверхностные физико-химические свойства смазочных материалов.

Объемные свойства масел обуславливают возникновение масляного слоя определенной толщины при трении в режиме жидкостной смазки. Поверхностные свойства масел определяют условия возникновения граничных пленок толщиной порядка 0,2 мкм.

Одним из способов снижения интенсивности изнашивания деталей и узлов автомобиля является нанесение на трущиеся поверхности приработочных и антифрикционных покрытий, которые на начальном этапе работы деталей предохраняют трущиеся поверхности от задиров и способствуют быстрому образованию оптимальной микрогеометрии поверхности, которая в последующем обеспечит минимальную интенсивность изнашивания. Существует множество спосо-

бов нанесения прирабочных покрытий из чистых металлов (олово, свинец, кадмий, медь и др.) и многокомпонентных сплавов (наиболее распространены химические, электрохимические, механические и плазменные). Для повышения износостойкости деталей применяют композиционные пленки на основе эпоксидной, кремнийорганической смол и другие, имеющие в своем составе вещества, создающие на поверхности трения разделяющийся слой сухой смазки с малым сопротивлением сдвигу.

Снижение интенсивности процессов изнашивания достигается за счет рационального выполнения операций технического обслуживания (ТО) автомобиля (если режимы технического обслуживания научно обоснованы и оптимальны). Кроме традиционных операций ТО в последнее время интенсивно разрабатываются новые способы – так называемая «подкапотная автохимия».

Считается, что впервые присадка в моторное масло, призванная улучшить его смазочные свойства, поступила в розничную торговлю в 1942 году в Чикаго. Вначале к этой новации многие ведущие производители масел отнеслись крайне отрицательно. Со временем разработка присадок, снижающих коэффициент трения, износ и восстанавливающих изношенные поверхности сопряженных деталей, становится серьезным научным направлением. При этом присадкой стали называть вещество, добавляемое к смазочному материалу для придания ему новых свойств или изменения существующих.

Долго считалось, что трение подвижных соединений является только разрушительным процессом, приводящим к отказу узла или машины в целом. Открытие избирательного переноса при трении, «эффекта безызносности», сделанное отечественными учеными под руководством Д.Н. Гаркунова в 1956 году, и ряд других научных и практических достижений позволили изменить сложившееся представление о механизме изнашивания и трения. Было обнаружено и взято на вооружение ранее неизвестное явление самопроизвольного образования тонкой неизнашиваемой пленки меди в парах трения бронза – сталь в условиях спиртоглицериновой среды, а позже и в среде хладонов.

Образование в зоне трения сервовитных (буквально – «спасающих жизнь») пленок может происходить не только за счет меди и не только из материала одной из трущихся деталей. Ремонтно-восстановитель-

ные препараты (их также называют металлоплакирующими компонентами или реметаллизантами) вводятся в смазочные материалы как присадки. На текущий момент реметаллизанты подразделяются на ионные и порошковые. Порошковые препараты в качестве основного компонента содержат ультрадисперсные порошки, а ионные — полностью маслорастворимые соли пластичных металлов, органические кислоты, мыла жирных и нафтеновых кислот, жирные амиды, эфиры жирных кислот и спиртов, а также глицерин. В качестве плакирующих металлов используются медь, олово, цинк, железо, алюминий, свинец, серебро, хром, никель.

Существенной проблемой применения порошковых препаратов является возможное оседание частиц и удержание их фильтрами. Так, в рекламных проспектах фирмы «ВМП» (г. Екатеринбург) указывается, что реметаллизант «РиМет» содержит частицы сплава меди, олова и серебра диаметром до 0,1 мкм. Присадки серии «Renom» — синтетические по своему происхождению и содержащие полностью маслорастворимые металлоорганические композиции — применяются в концентрации 4...6% от объема смазочного масла.

Реметаллизанты вводят в моторное и трансмиссионное масла, а также в консистентные смазки. Достаточно широко известны более 15 видов реметаллизантов, выпускаемых в Швейцарии, Великобритании, США, Бельгии и России. При использовании реметаллизантов следует учитывать, что существует критическая концентрация соединений, обладающих восстановительной способностью, выше которой наблюдается увеличение интенсивности изнашивания за счет активизации коррозионных процессов. Следует отметить, что образование устойчивых сервовитных металлических пленок — это постепенный и достаточно длительный процесс, поэтому резкого улучшения эксплуатационных показателей может не наблюдаться.

Полимерсодержащие препараты могут иметь в своем составе политетрафторэтилен (тефлон), перфторполиэфир карбоновой кислоты (эпилам), фторопласт-4, перфторпропиленоксид, полисилоксаны (силикон) и др. Эти препараты в основном применяют для повышения надежности и экономичности двигателей, их вводят как аэрозоль через впускной коллектор или в качестве добавок к моторному маслу. Препараты автохимии на основе силикона успешно применяют для

смазки соединений металла и пластика, устранения скрипа, восстановления эластичности резины, снижения ее коэффициента трения.

Применение полимерсодержащих препаратов может сопровождаться и негативными последствиями. Наблюдались случаи, когда в образовавшееся на поверхности трения тефлоновое покрытие при работе машины внедряются мелкодисперсные абразивные частицы и трение «полимер по полимеру» превращается в трение пары «абразивный круг – деталь». При использовании полимерсодержащих препаратов возможно увеличение нагарообразования на поршнях двигателя, ухудшение условий подачи масла по каналам и зазорам в сопряжениях. Как отмечается разработчиками, примененный единой полимерсодержащий препарат может находиться на трущихся поверхностях до 80 тыс. км пробега автомобиля и блокировать применение других ремонтно-восстановительных препаратов. К недостаткам следует также отнести токсичность полимеров.

К отдельной группе ремонтно-восстановительных препаратов, способствующих повышению износостойкости деталей автомобиля, можно отнести так называемые кондиционеры поверхности. Механизм действия этих препаратов основан на физической адсорбции, хемосорбции и химическом взаимодействии поверхностно-активных веществ (ПАВ) с поверхностями трения. В эту группу входят широко используемые отечественные присадки ДФ-11, ВИР-1, ПАФ-4 и др. При использовании присадок контактируемые участки поверхностей покрываются достаточно устойчивыми полимерными и полиэфирными структурами, которые создают эффект устойчивой «масляной шубы», способной исключить непосредственный контакт трущихся деталей.

Так как в процессе эксплуатации автомобиля присадки срабатываются, то для восстановления требуемых свойств масла полезно производить добавление присадок непосредственно в картер двигателя или коробки передач, что позволит увеличить ресурс агрегатов. Кондиционеры поверхности могут использоваться для защиты не только металлических поверхностей, но и резиновых и пластмассовых деталей. Есть специальные препараты, воздействующие на резиновые манжеты или уплотнительные кольца и восстанавливающие герметичность гидравлических цилиндров. Обработка препаратами приводных ремней восстанавливает их гибкость, упругость, повышает сцепление



ремней со шкивами. Применение препаратов этой группы также способствует замедлению процессов старения автомобиля.

В автохимии давно и успешно применяют в качестве добавок к смазочным материалам слоистые вещества: графит, дисульфид молибдена, нитрид бора, ряд йодистых комплексов. При работе слоистый материал заполняет микронеровности поверхностей трения и начинает воспринимать нагрузки, легко сдвигаясь при перемещении поверхностей. Следствием этого является уменьшение коэффициента трения и повышение износостойкости трущихся деталей. Особенно эффективно применение слоистых добавок в консистентные смазки и трансмиссионные масла.

Исследования показывают, что в зоне трения происходят не только процессы износа, но и регенерации трущихся поверхностей. Для обозначения этого процесса все более широко используют термин «ревитализация» (от лат. *vita* – жизнь), который можно толковать буквально как «возвращение жизни». Явление ревитализации базируется на уникальных физико-химических процессах, каковые при определенных условиях могут происходить в зоне трения. Суть их следующая. При работе механизмов на парах трения возникают нагрузки. При определенных значениях этих нагрузок выделяется избыточная энергия, направленная на разрушение поверхности. Если же внести в зону трения уникальный «строительный материал» – ревитализант, то в перегруженной зоне создаются такие условия, когда энергетически более выгодно строить новое, а не разрушать старое, т. е. знак меняется с минуса на плюс: энергия разрушения превращается в энергию созидания. В зоне износа атомы металла имеют наибольшее количество свободных (некомпенсированных) связей, которые, как магниты, захватывают и удерживают ревитализант, что приводит к нарастанию подвергшейся износу поверхности детали. Через несколько минут после начала ревитализации на месте царапины появляется металло-керамическая «заплата». Зона аномальной активности исчезает, энергетические процессы стабилизируются и рост поверхности прекращается. Одновременно происходит взаимная диффузия двух веществ (металла и металлокерамики), которая завершает процесс формирования нового покрытия, «цементирует» и тем самым уничтожает грозный эффект изнашивания поверхностного слоя детали.

В настоящее время рядом научно-технических центров активно разрабатывается новое направление, связанное с ревитализацией. Это направление получило наименование «геотрибология»: трение, износ, смазывание и восстановление в условиях применения различного рода минералов и других соединений геологического происхождения.

Целью работ в данном направлении является создание специальных добавок в топливо и смазочные материалы на базе металлокерамических соединений, способных вступать во взаимодействие с контактными (трущимися) участками деталей и формировать на них покрытие, устраняющее дефекты на поверхностях трения и обладающее высокими антифрикционными и противоизносными свойствами.

Началом указанных исследований стало необычное явление, обнаруженное при бурении сверхглубокой скважины на Кольском полуострове. Было выявлено, что при прохождении буровым инструментом горных пород, богатых минералом серпентином, ресурс режущих кромок инструмента резко увеличивался. Исследованиями было установлено, что вследствие диффузии элементов минерала в материал инструмента на его кромках образовывалась металлокерамическая структура, обладающая высокой твердостью, термостойкостью и износостойкостью.

Изучением данного явления начали заниматься с конца 80-х годов прошлого века несколько научных центров, и на данный момент предлагается около 10 видов препаратов, реализующих эффект образования на поверхностях трения металлокерамических покрытий. Разработчики препаратов рекомендуют обрабатывать двигатели автомобилей с пробега более 50 тыс. км и обычно в такой последовательности.

1. Слить старое масло, промыть двигатель.
2. Залить новое масло и прогреть двигатель до температуры охлаждающей жидкости 70...80°C.
3. Исключить подачу топлива в карбюратор и выработать из него весь бензин.
4. Вывернуть свечи и через каждое свечное отверстие ввести в каждый цилиндр по 5...10 мл состава.
5. Не вворачивая свечи, стартером 5...6 раз прокрутить двигатель в течение 10 секунд, каждый раз с интервалом между прокрутками 30...40 секунд.

6. Ввернуть свечи, подать топливо в карбюратор и запустить двигатель.
7. Оставшийся состав влить в заливную масляную горловину.
8. Поднять обороты двигателя до 3500 об/мин и поддержать их в течение 10...15 минут (по данным производителя, это очень важный момент).
9. Произвести замену масляного фильтра после пробега 1500...2000 км. Моторное масло можно не менять до 50 тыс. км, чем обеспечиваются наилучшие показатели обработки.

Некоторые производители рекомендуют более простую процедуру: просто доливать присадку в масло прогретого двигателя при его непрерывной работе в течение 10 мин.

Металлокерамический защитный слой, который образуется на поверхностях трения, может обладать уникальными триботехническими характеристиками:

- микротвердость 65...75 HRC
- шероховатость 0,1...0,3 мкм
- коэффициент трения 0,003...0,007
- температура разрушения 1700...2000°С.

Торгово-промышленная группа «Wagner», рекламируя смазочный материал с микрокерамикой, в присутствии клиента на специальной установке проводит опыт истирания ролика подшипника, который прижимается к вращающемуся валу. На рис. 3.28,*а* показана лунка износа ролика, прижимаемого к валу с усилием 400 Н и смазываемого обычным маслом SAE 30. Поверхность лунки имеет царапины и наплывы, что является признаком задира поверхностей. На рис. 3.28,*б* показана лунка износа ролика, прижимаемого к вращающемуся валу с усилием 2400 Н, после добавления в масло присадки. Лунка имеет малые размеры, поверхность гладкая блестящая, и это указывает на то, что при шестикратном увеличении нагрузки задира в трущемся контакте все-таки не произошло.

По данным разработчиков, применением присадки в двигателе и коробке передач достигается экономия топлива до 15%, длительность защиты до 60 тыс. км, износ деталей уменьшается в два раза, сокращается расход масла, снижается шум в коробке передач и обеспечивается плавное переключение передач.

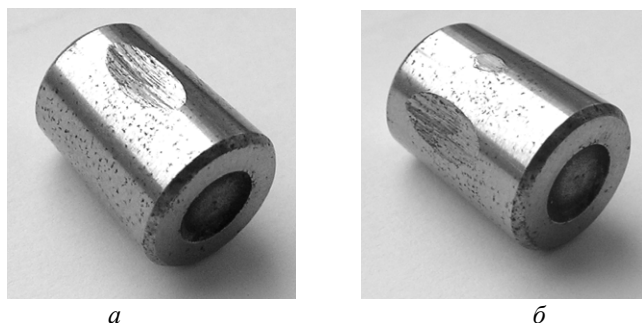


Рис. 3.28. Износ ролика при трении о вал (лунки сверху):  
*a* – при смазке обычным маслом SAE 30 и нагрузке 400 Н;  
*б* – при добавке в масло присадки и нагрузке 2400 Н

В отдельную и специфическую группу ремонтно-восстановительных препаратов могут быть выделены материалы, содержащие в своем составе структурные элементы, такие как наночастицы, нановолокна, нанотрубки и т. п. (от греч. *nannos* – карлик). Эти структурные элементы с геометрическими размерами менее 100 нм образуют наноматериалы, которые обладают качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Над возможностью создания наноматериалов люди стали задумываться достаточно давно. Так, древнеримский поэт и ученый Тит Лукреций Кар в своем произведении «О природе вещей» вводит понятия о «первоначалах вещей», складывая и сочетая которые можно получать различные вещества с различными свойствами.

В настоящее время интерес к новому классу материалов со стороны науки и промышленности постоянно увеличивается. Это обусловлено стремлением получить качественно новые материалы и миниатюрные изделия с уникальными свойствами, которые будут создавать иные возможности для развития бизнеса и повышения его конкурентоспособности.

Принципиально новые свойства материалов, кардинально отличающиеся от свойств микроструктурных материалов, возникают при уменьшении размеров зерен вещества менее 100 нм. Так, резкое повышение прочностных свойств материалов будет происходить при уменьшении размера зерна до величины бездефектного кристалла, значительное повышение магнитных свойств – до величины однодо-

менного кристалла, электрической проводимости — до длины свободного пробега электронов. Наноматериалы с уникальным сочетанием прочностных (твердость, теплостойкость, высокое сопротивление сдвигу и т. п.) и триботехнических (высокая износостойкость, низкий коэффициент трения и т. п.) свойств могут быть получены путем создания нанокристаллических слоев и пленок при помощи нанотехнологий, основанных на принципах самосборки и самоорганизации (термин «нанотехнология» впервые предложил японец Н. Танигучи в 1974 году). Под нанотехнологией понимают совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие структурные элементы с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба.

Наибольшего успеха в области разработки нанотехнологий достигли японские ученые, создавшие микроскопический «подшипник», в котором потери на трение близки к нулю. Эти потери настолько незначительны, что даже самые точные приборы не способны их зарегистрировать.

До недавнего времени было известно, что углерод образует три формы: графит, алмаз и карбин. В настоящее время стала известна и четвертая форма углерода, так называемый фуллерен алмаза. Его молекула содержит фрагменты с пятикратной симметрией (пентагоны), которые запрещены природой для неорганических соединений. Поэтому следует признать, что молекула фуллерена является органической молекулой, а кристалл, образованный такими молекулами, есть связующее звено между органическим и неорганическим веществом. Фуллерен был впервые получен в 1985 году, а в 1992-м обнаружен в природном состоянии в минерале шунгите (от названия поселка Шуньга в Карелии).

Фуллерены в виде вращающихся шариков в результате сложного технологического процесса вставили между удлиненными пластинками графита, реализовав принцип безыносного подшипника.

В последние годы нанотехнологии постепенно приходят и в машиностроение, и в автохимию. Алмазные наночастицы в зависимости от условий применения могут выступать либо в виде тончайшего абразива, либо эффективного модификатора трения. Оказалось, что

алмазная шихта (промежуточный продукт получения наноалмазов) чрезвычайно эффективна в виде добавок к моторным и трансмиссионным маслам, консистентным смазкам и смазочно-охлаждающим технологическим жидкостям. Различный набор наночастиц оказывает сильное структурирующее действие как на поверхности трения, так и на смазочный материал, изменяя его реологические характеристики. Добавление присадок с наночастицами в двигатели автомобилей после их пробега 100 тыс. км позволяет существенно продлить срок службы и ресурс агрегата.

В настоящее время выпускаются ремонтно-восстановительные препараты комплексного действия: например, в одном флаконе реметаллизант и кондиционер металла или полимерсодержащий препарат и слоистая добавка. Однако следует иметь в виду, что применение разных препаратов одновременно и даже поочередно в одном и том же агрегате может привести к нежелательным последствиям, исключаящим положительный эффект или даже снижающим ресурс деталей.

Снижение интенсивности процессов изнашивания деталей и узлов автомобиля достигается не только за счет присадок. Весьма полезным может быть использование препаратов для очистки деталей от нагара и смолистых отложений без разборки агрегатов или для удаления накипи и шлама из системы охлаждения двигателя.

Состояние лакокрасочных покрытий может сохраняться длительное время, если применять полироли и консерванты, которые при обработке кузова попадают в возникающие в процессе эксплуатации трещины и мелкие сколы покрытий и затормаживают процессы разрушения покрытия и коррозию кузова. Периодическая обработка внутренних полостей кузова антикоррозийными материалами также поможет существенно продлить срок службы автомобиля.

Рассмотренные способы снижения интенсивности изнашивания деталей и узлов автомобиля дают представление о возможных методах увеличения долговечности автомобиля в процессе эксплуатации и в общем случае способствуют лучшему пониманию задач производства качественных машин.

Следует отметить, что эксплуатационные способы снижения интенсивности процессов изнашивания деталей и узлов автомобиля, по сути, являются перекаладыванием забот производителя по созданию

качественного и надежного автомобиля на плечи потребителя. Эта тенденция, отчетливо выраженная в России, имеет место и в странах с более развитыми технологиями производства автомобилей.

Из ежегодных отчетов авторитетного немецкого Союза технического контроля автомобилей (VdTUV), который уже в течение 35 лет анализирует все эксплуатирующиеся на территории Германии автомобили, следует: надежность автомобиля слабо зависит от его цены и всегда зависит от срока эксплуатации. Все автомобили изнашиваются, с годами снижается их надежность, но этот процесс у разных автомобилей проходит по-разному и определяется способностью или неспособностью производителя изготовить автомобиль, надежный на всем периоде его эксплуатации.

Анализ опубликованных данных по результатам проверки в 2006 году примерно 7 млн немецких автомобилей и эксплуатирующихся в Германии иномарок 186 моделей приведен в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Изменение надежности различных моделей автомобилей по мере их старения

Показатели	Возрастные группы автомобилей, лет				
	2–3	4–5	6–7	8–9	10–11
Процент поломок самой ненадежной детали автомобиля (max)	25,1	33,9	30,5	35,7	37,7
Процент поломок самой надежной детали автомобиля (min)	11,3	18,2	23,3	29,6	34,2
Соотношение поломок, max/min	2,22	1,86	1,31	1,21	1,10

Из таблицы следует, что количество поломок (дефектов, обнаруживаемых при технических осмотрах) в год существенно отличается для разных моделей автомобилей и по мере срока их службы возрастает. При двух-трехлетней эксплуатации самого ненадежного автомобиля процент его поломок (25,1%) превышает процент поломок самого надежного автомобиля (11,3%) в 2,22 раза, что по уровню поломок (23,3%) начинает приближаться к новому ненадежному автомобилю только после 6...7 лет эксплуатации. Однако по мере старения машин соотношение поломок (max/min) для категории ненадежных и надежных автомобилей начинает приближаться к единице, т. е. их надежность выравнивается.

На основании приведенных данных можно заключить, что разница между надежными и ненадежными автомобилями на начальном этапе эксплуатации вряд ли существенно зависит от их конструктивных отличий, влияющих на показатели безотказности. Очевидно, главной причиной является уровень культуры производства, включая контроль качества комплектующих, поступающих на сборку, и самих процессов сборки автомобилей. По мере эксплуатации изначально ненадежного автомобиля происходит «исправление ошибок производителя» путем замены недоброкачественных деталей и узлов и проведения необходимых регулировок, причем главным образом за счет потребителя. Выравнивание надежности автомобилей разного первоначального качества хотя бы через 10 лет – это, конечно, хорошо, но – поздно, так как автомобили к этому времени уже морально устарели.

Как отмечают эксперты VdTUV, основными дефектами, из-за которых на ремонт в автосервисы отправляются даже гарантийные автомобили, являются: неисправности тормозов (2,3%), отказы и нарушения регулировок осветительных приборов (8,5%), дефекты подвески (2,0%), а также утечка масла (1,1%). Эти дефекты регистрируются уже на двух-трехлетних автомобилях, а после 4...5 лет эксплуатации к ним, как правило, добавляются еще неисправности выхлопной системы, которые регистрируются у 9,3% десятилетних автомобилей, приезжающих на инструментальный контроль.

Те же эксперты отмечают общее снижение показателя надежности современных автомобилей: если в 1996 году лишь 11,6% трехлетних машин не смогли с первого раза пройти техосмотр, то через десять лет, в 2006-м, общий процент неисправностей автомобилей с тем же сроком службы заметно увеличился, достигнув 18,2%.

Очевидно, что для российской автомобильной промышленности проблема производства автомобилей со стабильно высоким уровнем качества стоит еще более остро. Если также учесть, что каждый второй из 26 млн автомобилей в нашей стране старше 10 и каждый третий – старше 15 лет (а при таком сроке службы процент поломок даже более качественных импортных автомобилей превышает 35% и мало зависит от их исходного качества, см. табл. 3.1), то старение парка отечественных автомобилей представляется не только экономической, но и крупной социальной проблемой.



В последнее время разработка критериев оценки старения автомобиля становится рыночной потребностью. Это связано с необходимостью экономической оценки степени старения автомобиля при его обязательном и добровольном страховании (первоначальная оценка объекта страхования, определение остаточной стоимости при наступлении страхового случая), при осуществлении налоговой и таможенной политики правительства РФ.

Так, экологический налог и таможенные пошлины предлагается осуществлять с учётом старения автомобиля. Вероятно, данный подход справедлив с экономической точки зрения, однако предлагаемые или уже используемые методики оценки степени старения автомобиля с помощью коэффициентов, не в полной мере учитывающих условия эксплуатации автомобиля, несовершенны и чаще всего ущемляют интересы потребителя. Разработка объективных критериев степени старения автомобилей может быть произведена только высококвалифицированными инженерами-специалистами, досконально знающими условия эксплуатации автомобиля и его поведение в этих условиях.

#### *Контрольные вопросы*

1. Какой основной эффект возникает в паре трения от действия смазочных материалов?
2. Каким требованиям должны удовлетворять смазочные материалы?
3. Какая роль отводится приработочным покрытиям деталей?
4. Можно ли уменьшить зазор в сопряжении деталей, не разбирая узел?
5. Можно ли повысить износостойкость поверхностей деталей узла без его разборки? Если да, то как?
6. Каким образом можно восстановить герметичность гидроцилиндра без его разборки?

### **3.8. Установление предельно допустимых износов в узлах и деталях машин**

*Предельно допустимый износ* — это такой износ детали, при котором ее дальнейшее использование может привести к отказу узла или машины. Установление предельно допустимых износов деталей машин является очень важной задачей, необходимой для определения ресурса изделий и, соответственно, момента, в который требуется

восстанавливать деталь. Эта задача до настоящего времени не имеет в полной мере научно обоснованного решения. Основной проблемой расчета износа деталей и их сопряжений является отсутствие универсальной теории взаимодействия твердых тел при физических и механических процессах, развивающихся в зоне трения. Прогнозирование долговечности изнашиваемых деталей существенно упрощается при постоянной интенсивности изнашивания, однако во многих случаях это условие не соблюдается.

При оценке долговечности машин (автомобилей, технологического оборудования и т. п.) необходимо установить предельные износы  $U_{\max}$ , до которых можно допускать износ отдельных деталей и сопряжений. Критерии предельного износа в одних случаях связаны только с работой данного сопряжения или детали, в других – с работой нескольких деталей, когда изменение геометрии деталей влияет на кинематические и динамические характеристики машины в целом.

При определении предельно допустимого износа необходимо учитывать обстоятельства, при которых эксплуатация машины должна быть прекращена:

- в результате износа машина не может больше работать (происходит поломка детали, заклинивание механизма или невыполнение им своих функций);
- износ рассматриваемой детали приводит машину в режим интенсивной потери ее работоспособности (возникают удары, вибрации, перегрузка узлов, интенсивное изнашивание сопряженных поверхностей, повышается температура и т. п.);
- в результате износа технические характеристики машины выходят за допустимые или рекомендуемые пределы (ухудшается качество выполняемой машиной продукции или работы, понижается производительность, падает коэффициент полезного действия, возрастают экономические затраты в процессе использования машины и т. д.).

В общем случае для установления предельно допустимых износов деталей и сопряжений можно исходить из трех основных критериев: технического (учитывается состояние и степень работоспособности машины), технологического (рассматривается качество выполняемой машиной работы) и экономического (оцениваются показатели эффективности машины). При этом следует иметь в виду, что лишь один

из них может быть установлен в качестве основного критерия для определения предельно допустимого износа любой детали или любого сопряжения. Выбор основного критерия для деталей определенных узлов и агрегатов машины осуществляется в зависимости от их назначения. Остальные два критерия можно использовать в качестве вспомогательных или контрольных.

Технический критерий может быть применен в качестве основного для оценки предельно допустимых износов деталей передаточных механизмов (трансмиссии, редукторов и т. д.) машин и оборудования. Оценку технического состояния передаточных механизмов можно производить по интенсивности изнашивания деталей. Резкий рост интенсивности изнашивания свидетельствует о наступлении периода ускоренного изнашивания, при котором эксплуатация машин должна быть прекращена. Для коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания величину предельно допустимого износа целесообразно устанавливать из условий предупреждения полного разрушения коренных и шатунных подшипников, а также из условий возможного обрыва шатунных болтов при возникновении ударных нагрузок.

Возрастание потерь энергии сгорающего топлива вследствие износа цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания снижает коэффициент его полезного действия. В этом случае для определения предельного износа деталей может быть использован экономический критерий.

Технологический критерий к передаточным механизмам автомобиля применяется редко, так как эти механизмы не оказывают прямого влияния на качество выполняемой автомобилем работы. Для металлообрабатывающего оборудования износы деталей могут существенно влиять на точность получаемых размеров изготавливаемых деталей и качество их поверхностей, т. е. в этом случае технологический критерий можно считать главным.

В качестве основного технологического критерия может служить для деталей и сопряжений рабочих органов машин. К таким деталям можно отнести ножи бульдозеров и автогрейдеров, при износе которых происходит самопроизвольное выглубление ножей из грунта, что приводит к снижению качества выполняемой ими работы. Кроме того, при износе лезвия ножа автогрейдера на 14...15 мм сопротив-

ление резанию грунта возрастает до 50% от общего затрачиваемого усилия, поэтому в качестве контрольного здесь может выступать экономический критерий, так как износ вызывает повышенный расход энергии при выполнении земляных работ.

Детали и сопряжения двигателя, непосредственно управляющие энергетическими процессами (топливная аппаратура, газораспределительный механизм, цилиндропоршневая группа деталей, коллектор впускных и выпускных труб, механизм регулирования и др.), должны оцениваться экономическим критерием, так как изменения в деталях этих механизмов, возникающие вследствие изнашивания, приводят к нарушению процессов выработки энергии. Эти нарушения оказывают влияние на снижение мощности двигателя и, следовательно, на производительность машины, а также на расход эксплуатационных материалов. В изношенных двигателях расход топлива на 25...40%, а затраты моторного масла в 2...3 раза больше, чем по нормам новых двигателей. О технологическом критерии может идти речь лишь при резко изменяющемся режиме работы неисправного двигателя.

Процедура установления предельно допустимого износа конкретной детали или сопряжения осуществляется следующим образом. Вначале предельно допустимый износ определяется по основному критерию. Затем, если это представляется возможным, проверяется по остальным двум контрольным критериям.

Для деталей, ремонтируемых при периодических плановых ремонтах, допустимые износы  $U_{\text{доп}}$  будут меньше предельных  $U_{\text{max}}$ , так как деталь не должна выйти из строя в течение последнего межремонтного периода. Плановые ремонты проводят для снегоуборочных и сельскохозяйственных машин, в том числе автомобилей, используемых при уборке урожая. Плановые ремонты также обязательно проводят в том случае, когда отказ техники приводит к возникновению аварийных ситуаций.

Если длительность межремонтного периода, т. е. время или наработка между плановыми ремонтами,  $T_1$ , то за этот период износ детали возрастает на величину  $\gamma T_1$ . Поэтому допустимое значение износа, начиная с которого при периодических ремонтах необходимо ремонтировать деталь, будет равно  $U_{\text{доп}} = U_{\text{max}} - \gamma T_1$ . Учитывая, что  $\gamma = U_{\text{доп}} / T$ ,

где  $T$  – время работы детали до ремонта, получим

$$U_{\text{ДОП}} = U_{\text{max}} - \frac{U_{\text{ДОП}} T_1}{T},$$

откуда

$$U_{\text{ДОП}} = \frac{U_{\text{max}}}{1 + \frac{T_1}{T}}.$$

Выражая общее время работы детали через количество проводимых плановых ремонтов  $T = kT_1$ , можно записать формулу для определения допустимого износа:  $U_{\text{ДОП}} = U_{\text{max}} \frac{k}{k+1}$ .

*Пример.* Деталь имеет глубину цементированного слоя 0,8 мм и предельный износ 0,65 мм (80% глубины слоя). Надо ли восстанавливать деталь, если в процессе контроля при проведении третьего планового ремонта машины износ детали оказался равным 0,55 мм?

Подсчитаем допустимый износ, используя полученную формулу:

$$U_{\text{ДОП}} = U_{\text{max}} \frac{k}{k+1} = 0,65 \frac{3}{3+1} = 0,49 \text{ мм.}$$

Следовательно, деталь надо восстанавливать или заменять, так как хотя ее износ и меньше, чем  $U_{\text{max}}$ , но она не дослужит до следующего планового ремонта.

Тот же результат может быть получен на основе простого логического рассуждения. Деталь к моменту планируемого 4-го ремонта машины может оставаться работоспособной, только если при 3-м ремонте износ детали не более  $\frac{3}{4}$  максимального износа.

Напомним, что формула для расчета  $U_{\text{ДОП}}$  выводилась на основе предположения о линейной зависимости нарастания износа, на практике эта зависимость может быть более сложной.

На основе эмпирических данных определены величины предельно допустимых износов некоторых рабочих поверхностей гладких и шлицевых валов, которые в большинстве случаев лимитируют ресурс узлов и агрегатов. Так, поверхности под подшипники восстанавливают при износе 0,017...0,06 мм; поверхности неподвижных соединений (места под ступицы со шпоночными пазами и др.) за счет дополнительных ремонтных деталей – при износе 0,04...0,13 мм; под уплотнения – при износе 0,15...0,2 мм; поверхности подвижных соединений – при износе 0,4...1,3 мм. Шпоночные пазы восстанавливают при

износе по ширине 0,065...0,095 мм; шлицевые поверхности – при износе по толщине зуба 0,2...0,5 мм.

---

---

### *Контрольные вопросы*

1. Что понимается под предельно допустимым износом деталей?
2. Какие критерии используются для определения предельно допустимого износа деталей?
3. Какая роль отводится контрольным критериям при определении предельно допустимого износа деталей?
4. В каком случае для определения предельно допустимого износа деталей в качестве основного используется технологический критерий?
5. В каком случае для определения предельно допустимого износа деталей в качестве основного используется экономический критерий?

## 4. СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Способы восстановления в большинстве случаев применяют для создания ремонтной заготовки, из которой посредством удаления технологического припуска при проведении механической обработки получают изделие, и значительно реже — для получения готового изделия с необходимыми размерами, формой и физико-механическими свойствами материала.

Существуют различные технологические способы получения ремонтной заготовки с вложением или без вложения в них энергии: наплавка (60...80%); напыление (6...12%); нанесение гальванических покрытий (4...7%); электроконтактная приварка металлического слоя (3...7%); нанесение полимерных покрытий (2...6%); установка и закрепление дополнительных ремонтных деталей (2...3%); пластическое деформирование (2...3%). Из этих способов предпочтение отдают ресурсосберегающим технологиям нанесения упрочняющих покрытий, в первую очередь наплавке, напылению и гальваническим технологиям, позволяющим получать покрытия со свойствами, существенно отличающимися от свойств материала исходной заготовки. Новое качество поверхности восстановленной детали, в свою очередь, определяет ресурс механизма, в который она входит.

При выборе способов восстановления необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- тип сопряжения, вид взаимодействия (относительного перемещения) составляющих его деталей, вид и характер изнашивания, условия эксплуатации, определяемые видом нагружения (статическим, динамическим, циклическим и т. п.);
- при восстановлении исходной заготовкой является изношенная деталь, у которой поверхностный слой материала имеет пониженные физико-механические свойства, а размеры и форма детали, как правило, отличаются от номинальных значений;
- при восстановлении деталей помимо их первоначальных размеров необходимо также восстанавливать физико-механические свойства материала;

- при восстановлении, как правило, необходимо сохранять неизменными (номинальными) размеры и форму всех невозстанавливаемых поверхностей деталей;
- при восстановлении необходимо обойтись минимальным объемом термической и механической обработки детали.

При выборе способа восстановления также следует руководствоваться технико-экономическими показателями целесообразности его применения. Техническую целесообразность применения способа оценивают ресурсом восстановленных поверхностей, деталей и сопряжений в целом, экономическую – затратами потребителя при реализации технологии восстановления. По соображениям самоокупаемости оценивают, что дешевле – восстановление или замена изношенных деталей на новые. Затраты потребителя на восстановление не должны превышать затраты на новые запасные части с учетом их ресурса.

Организационными показателями являются коэффициенты использования оборудования и приведенные затраты на восстановление. Коэффициенты использования оборудования должны быть ниже нормативных, а приведенные затраты по предпочтительному варианту должны быть минимальными.

#### **4.1. Способы восстановления деталей пластическим деформированием**

Восстановление деталей способами объемного и поверхностного пластического деформирования основано на использовании пластических свойств материала восстанавливаемых деталей, т. е. способности при определенных условиях нагружения приобретать остаточные деформации. В результате пластического течения материала под действием приложенных сил происходит его избирательное перераспределение с нерабочих на изношенные поверхности. Эти способы экономичны, так как не требуют нанесения дополнительного металла и применения сложного технологического оборудования. Они, как правило, позволяют в рамках одной технологической операции решить комплексную задачу обеспечения качества изделий путем одновременного восстановления размеров, формы изношенных деталей и упрочнения материала. Способы пластического деформирования



могут быть использованы для восстановления точности деталей путем устранения пространственной погрешности взаимного расположения поверхностей (устранения коробления изделий правкой), для восстановления размеров и формы изношенных поверхностей, восстановления физико-механических свойств поверхностного слоя материала и повышения несущей способности контактных поверхностей путем создания на них регулярного микрорельефа.

#### 4.1.1. Способы правки деталей

В процессе эксплуатации многие детали автомобилей (коленчатые и распределительные валы, валы коробок передач, полуоси, шатуны и др.) теряют свою первоначальную точность из-за остаточных деформаций изгиба и скручивания, т. е. вследствие образования пространственной погрешности (коробления) деталей. В авторемонтном производстве для восстановления точности деформированных деталей применяют в основном способ правки упругопластическим изгибом (правка под прессом).

На рис. 4.1,*а* приведена схема правки вала упругопластическим изгибом. Правку установленной в призмах детали производят при помощи прессы. Под действием силы  $P$  осуществляют перегиб вала, который контролируют индикатором часового типа. Величина перегиба обусловлена упругой деформацией (отдачей) изделия, возникающей после снятия нагрузки. В зависимости от жесткости деталей их перегиб в момент правки может превышать исходный прогиб до 10 раз, т. е. если исходный прогиб равен 0,1 мм, то при правке величина перегиба будет составлять 1,0 мм. При этом со стороны приложенного усилия деформирования возникают напряжения сжатия, а с противоположной стороны – напряжения растяжения, превосходящие в поверхностных слоях  $h_s$  предел текучести материала  $\sigma_T$  (рис. 4.1,*б*), что вызывает пластическую деформацию металла в этих слоях.

После снятия усилия правки упругодеформированные волокна металла в сердцевине вала стремятся вернуться в исходное состояние, однако этому мешают волокна материала, которые были пластически деформированы. Таким образом, в пластически деформированных слоях образуются напряжения другого знака, чем при действии нагрузки. Так, в волокнах, стремящихся сжаться, возникают остаточные напряжения

сжатия, а в волокнах, стремящихся растянуться, — остаточные напряжения растяжения. Вал после правки занимает равновесное напряженно-деформированное состояние, соответствующее прямолинейному положению оси изделия. Но несимметрично сформированные относительно оси детали остаточные напряжения (рис. 4.1, *б*) при последующей механической обработке, связанной с удалением технологического припуска, приводят к существенному нарушению напряженного состояния изделия и, как следствие, образованию значительной остаточной деформации изгиба. Кроме того, в процессе эксплуатации выпрямленной детали она имеет тенденцию к частичному возврату к исходной остаточной деформации. Величина этого возврата во многих случаях зависит от уровня остаточных напряжений.

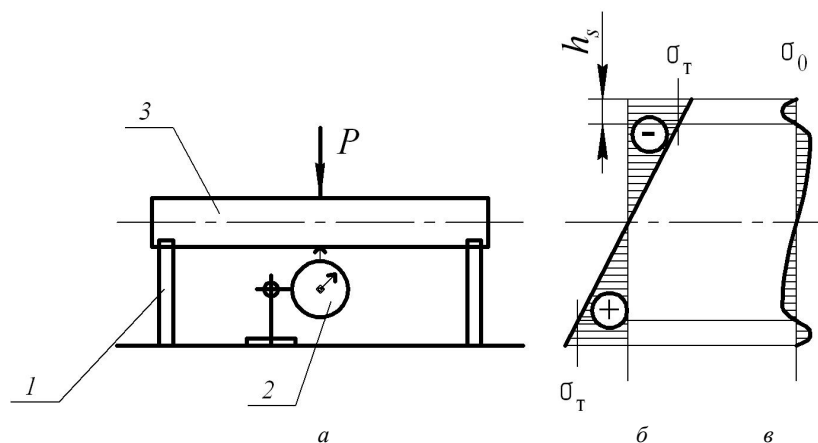


Рис. 4.1. Схема правки изогнутого вала и эпюры напряжений в исправляемой детали: *а* — деформация детали на прессе (1 — призма; 2 — индикатор часового типа; 3 — деталь); *б* — напряжения в сечении вала в процессе правки; *в*) остаточные напряжения в сечении вала после правки

Уменьшить уровень остаточных напряжений и, следовательно, вероятность образования остаточных деформаций изгиба в процессе эксплуатации можно путем правки детали в горячем состоянии. Деталь нагревают в печи до температуры порядка  $250^{\circ}\text{C}$  и уже после этого производят правку. В этом случае величина остаточных напряжений снижается в 2 раза по сравнению с правкой в холодном состоянии. Кроме того, остаточные напряжения можно снять путем нагрева

стальных деталей до температуры рекристаллизации и последующего медленного охлаждения. Так, при проведении высокого отпуска (550°С) уровень остаточных напряжений в детали снижается в 3,5 раза. Уменьшению вероятности образования дополнительных остаточных деформаций изгиба также способствует выравнивание остаточных напряжений по объему детали, которое происходит при проведении термической обработки.

Правку упругопластическим изгибом не рекомендуется проводить для прецизионных деталей, так как она имеет следующие недостатки:

- трудно поддается контролю;
- снижает усталостную прочность детали, так как при пластическом деформировании в поверхностном слое развиваются микротрещины; поэтому правку тем более нельзя применять для закаленных деталей;
- после правки в поперечном сечении формируются несимметричные относительно оси детали остаточные напряжения, которые при последующей механической обработке или в процессе эксплуатации опять приводят к короблению детали.

В настоящее время самыми прогрессивными являются методы правки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Эти методы впервые были разработаны в России и получили широкое применение в автомобильной промышленности развитых западных стран. В их основе лежит управление напряженным состоянием детали в процессе обработки.

Для реализации способов разработаны две основные принципиальные схемы технологического управления напряженным состоянием деталей. Управлять напряженным состоянием в процессе обработки деталей типа валов при правке ППД можно двумя способами:

- 1) изменением интенсивности пластической деформации в зоне контакта инструмента с деталью, поскольку эта интенсивность определяет уровень и характер распределения начальных напряжений в поверхностном слое;
- 2) изменением упругонапряженного состояния детали, которое формируется перед обработкой или в процессе обработки за счёт дополнительного, в основном силового воздействия технологической оснастки на заготовку.

Физическая сущность исправления коробления по первой технологической схеме заключается в создании несимметричной относительно оси заготовки эпюры начальных напряжений, способной вызвать изгибную деформацию детали обратного знака по отношению к исходной остаточной деформации.

Для реализации схемы разработаны технологические методы правки ППД, в которых управление напряженным состоянием детали в процессе обработки производится путём изменения силы, приложенной к инструменту (рис. 4.2). На практике наиболее просто можно осуществить гармонический закон изменения силы поджима инструмента (рис. 4.3):

$$P = P_o + P_a \cos\varphi, \quad (4.1)$$

где  $P_o$  – постоянная составляющая силы, приложенной к инструменту;  $P_a$  – амплитуда изменения силы;  $\varphi$  – угол поворота обрабатываемой детали.

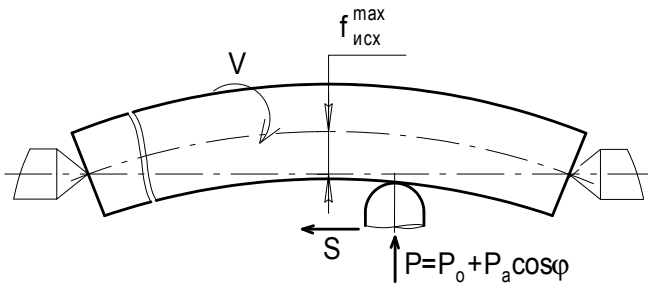


Рис. 4.2. Схема правки ППД с изменением силы, приложенной к инструменту в процессе обработки

В результате воспроизводства закона изменения силы (4.1) на каждом обороте детали с вогнутой стороны заготовки прикладывается максимальная  $P_{\text{max}}$ , а с выпуклой – минимальная сила  $P_{\text{min}}$  поджима инструмента (рис. 4.3). Таким образом, сила  $P$ , приложенная к инструменту, в процессе обработки состоит из постоянной  $P_o$  и переменной  $\Delta P$  составляющих. Постоянная составляющая  $P_o$  выбирается из условия осуществления оптимального режима пластического деформирования, при котором достигается минимальная шероховатость и максимальная твердость обработанной поверхности.

Переменная составляющая  $\Delta P$  обусловлена амплитудой  $P_a$  изменения силы, значение которой рассчитывается в зависимости от величины остаточной деформации изгиба заготовки  $f_{исх}^{max}$ .

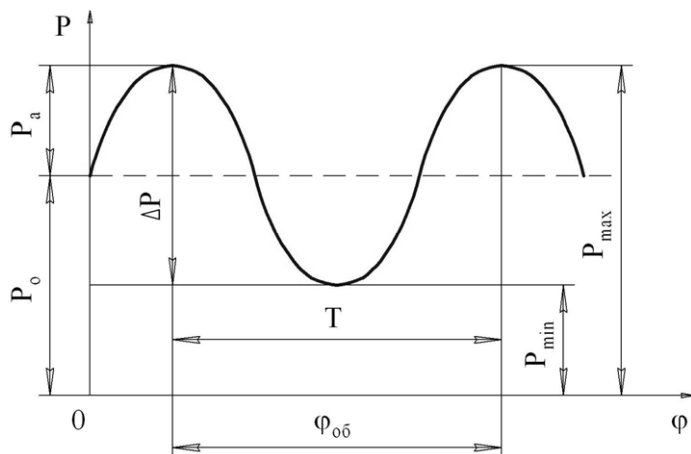


Рис. 4.3. Закон изменения силы, приложенной к инструменту в процессе правки ППД

В результате изменения силы  $P$  по закону (4.1) материал поверхностного слоя с вогнутой стороны детали получает большую интенсивность пластической деформации, чем с выпуклой. При этом формируется несимметричная относительно оси заготовки эпюра начальных напряжений, которая при разгрузке вызывает изгибающий момент, исправляющий исходную остаточную деформацию заготовки.

Физическая сущность исправления остаточной деформации по второй технологической схеме управления напряженным состоянием детали заключается в создании предварительных напряжений в заготовке путем упругого изгиба в направлении, противоположном исходной остаточной деформации, и изменении упругонапряженного состояния в процессе ППД при постоянных параметрах режима обработки. Изменение предварительного упругонапряженного состояния заготовки при поверхностном упрочнении позволяет при разгрузке уменьшить упругую отдачу детали и устранить таким образом исходную остаточную деформацию.

Управление остаточной деформацией заготовки путем изменения ее предварительного упругонапряженного состояния можно наглядно продемонстрировать на следующем примере. Закрепленную с одной стороны цилиндрическую винтовую пружину растянем на определенную величину. При фиксации пружины в таком положении в ней остается внесенная потенциальная энергия деформации растяжения. Если освободить пружину от закрепления, то потенциальная энергия перейдет в кинетическую энергию движения и пружина восстановит свои первоначальные размеры. Если же на каком-либо участке растянутой пружины материал получит пластическую деформацию, например, при ударе слесарным молотком, то после раскрепления пружина уже не вернется к своей первоначальной длине. Не вникая в причины этого явления, можно с уверенностью утверждать, что она получит остаточное растяжение. Причем величина остаточного растяжения будет зависеть от степени пластической деформации материала пружины и длины участка, получившего упрочнение.

Для реализации второй технологической схемы разработан метод правки ППД, в котором упругое деформирование заготовки перед обработкой осуществляют путем приложения к ее концам внешних изгибающих моментов  $M$  (рис. 4.4), позволяющих в каждом поперечном сечении выполнить условие:

$$f_{\text{перг}}(z) = \xi f_{\text{исх}}(z), \quad (4.2)$$

где  $f_{\text{перг}}(z)$  – текущее значение деформации перегиба по длине заготовки;  $\xi$  – коэффициент перегиба;  $f_{\text{исх}}(z)$  – текущее значение исходной остаточной деформации по длине заготовки.

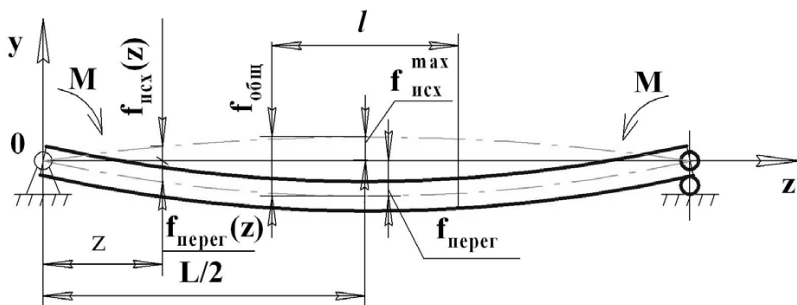


Рис. 4.4. Схема деформации заготовки перед обработкой ППД

Условие (4.2) необходимо для полного устранения технологической остаточной деформации при обработке ППД всей поверхности заготовки.

Заготовку упруго деформируют по схеме чистого изгиба двумя равными изгибающими моментами  $M$ . При этом общая упругая деформация заготовки составляет

$$f_{\text{общ}} = f_{\text{исх}}^{\text{max}} + f_{\text{перег}}, \quad (4.3)$$

где  $f_{\text{общ}}$  – общая упругая деформация заготовки.

При упругом изгибе заготовки в соответствии с законом Гука в поперечном сечении возникают осевые напряжения, которые распределяются вдоль радиуса по линейному закону (рис. 4.5,а).

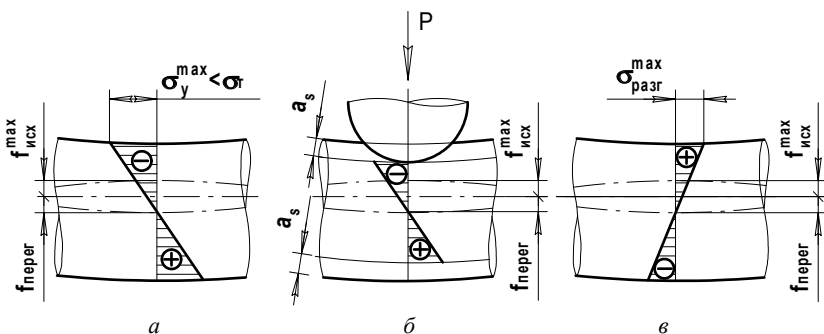


Рис. 4.5. Эпюры напряжений в поперечном сечении детали: а – после упругого изгиба заготовки перед обработкой; б – в процессе обработки ППД; в – в первоначальный момент раскрепления детали

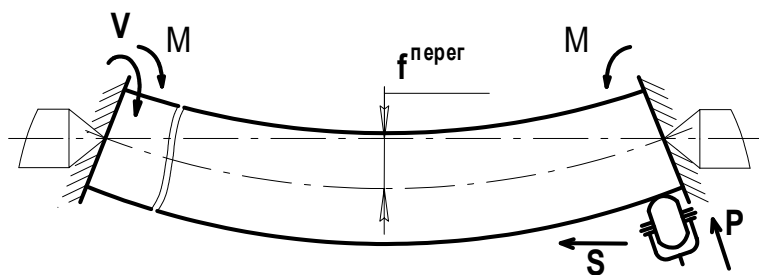


Рис. 4.6. Схема правки ППД вращающейся упругодеформированной заготовки

Пластическое деформирование (например, обкатывание роликом или шаром) поверхности упругодеформированной заготовки производят на постоянных параметрах режима: сила, приложенная к инструменту,  $P$ , подача  $S$ , окружная скорость  $V$  (рис. 4.6).

В процессе ППД под воздействием инструмента в поверхностном слое глубиной  $a_s$  развивается пластическая деформация, которая снимает предварительные напряжения  $\sigma_y$  и формирует симметричную относительно оси заготовки эпюру начальных напряжений (на рис. 4.5, б эпюра начальных напряжений не показана).

В результате потенциальный изгибающий момент уменьшится на величину, пропорциональную площади снятых в пластически деформируемом слое напряжений.

После обработки и раскрепления детали в поперечных сечениях обработанного участка возникает изгибающий момент возврата, обусловленный начальными (разгрузочными) напряжениями. Под воздействием момента возврата  $M_{\text{воз}}$  происходит изгибная деформация  $f_{\text{разг}}$ , которая определяет упругую отдачу детали. Деформация  $f_{\text{разг}}$ , равная по величине  $f_{\text{перез}}$ , совмещает действительную ось детали с её номинальным положением, т. е. выпрямляет изделие.

Сохранение точности выправленных деталей при деформационном изнашивании является одним из принципиальных вопросов при выборе способа правки. Деформирование изделия в процессе эксплуатации приводит к возникновению дисбаланса. Для деталей, работающих в условиях высоких скоростей и знакопеременных нагрузок, дисбаланс является причиной высокочастотных колебаний (вибраций). Вибрации приводят к интенсивному развитию трещин, движение которых заканчивается изломом детали или разрушением подшипников. В результате происходит авария агрегата.

Сравнительный анализ интенсивности деформационного изнашивания деталей после правки различными способами показал, что наибольшие дополнительные деформации изгиба происходят у деталей после правки упругопластическим изгибом и составляют 19,2% от величины исходной остаточной деформации, затем у деталей после правки растяжением – 7,1% и, наконец, наименьшие дополнительные деформации (2,7%) наблюдаются у деталей после правки ППД.



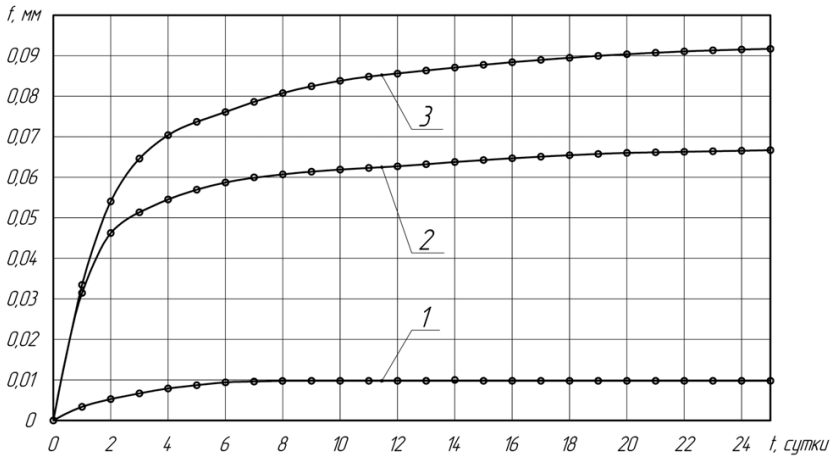


Рис. 4.7. График интенсивности деформационного изнашивания изделий, выпрямленных различными методами правки:  
 1 — после правки упругопластическим изгибом; 2 — после правки растяжением; 3 — после правки ППД

Правку топливных и масляных трубок производят при помощи шариков или специальных дорнов (рис. 4.8), которые перемещают внутри деформированных трубок за счет давления масла. Для создания необходимого давления масла можно использовать насос высокого давления. Перед правкой деформированные трубки прикручивают ниппелями к коллектору, куда подается масло под давлением из насоса. Находящийся в трубке шарик или дорн, проходя через трубку, устраняет вмятины.

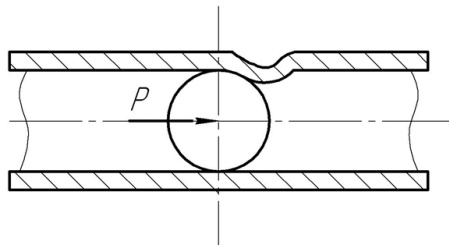


Рис. 4.8. Схема правки трубок шариком

### Контрольные вопросы

1. Какие виды дефектов детали могут быть устранены пластической деформацией?
2. Какие способы правки вы знаете?
3. Как осуществляют правку упругопластическим изгибом?
4. Как можно управлять напряженным состоянием детали при правке ППД?
5. Может ли выпрямленный правкой вал в процессе эксплуатации опять изогнуться?

#### **4.1.2. Способы восстановления деталей объемным и поверхностным пластическим деформированием**

Способы объемного и поверхностного пластического деформирования применяются для восстановления линейных размеров и формы деталей, а также для повышения несущей способности рабочих поверхностей путем создания на них регулярного микрорельефа. Под воздействием внешней силы возникает пластическое течение материала, в результате которого происходит принудительное его перераспределение в объеме детали и заполнение изношенных участков. Кроме этого, пластическое деформирование позволяет повысить упругие свойства (модуль упругости) материала ремонтной заготовки за счет глубоких структурных превращений. При определении условий, в которых должно проводиться пластическое деформирование деталей и, в частности, для расчета усилий деформирования, а также для разработки конструкции приспособлений, применяемых при восстановлении, необходимо руководствоваться следующими основными положениями:

- пластическая деформация, приводящая к необратимому изменению размеров и формы детали, может наступить только в том случае, если напряжения сдвига от действия внешней силы превышают предел текучести материала;
- деформация детали представляет собой сумму двух ее составляющих: упругой и пластической деформаций. После снятия нагрузки происходит обратная упругая деформация материала, приводящая к частичному восстановлению размеров и формы детали. Поэтому величину упругой деформации необходимо учитывать при повышенных требованиях к размерам восстанавливаемой детали;

- объем материала детали до пластической деформации равен объему материала после ее деформации;
- под воздействием пластической деформации каждая точка деформируемого тела перемещается в направлении наименьшего сопротивления. Поэтому для того, чтобы переместить металл в требуемом направлении (на изношенную поверхность), необходимо ограничить его пластическое течение в других направлениях.

При восстановлении деталей применяют следующие способы пластического деформирования: осадку, обжатие, вдавливание, вытяжку, раздачу, накатку и др. Выбор того или иного способа пластического деформирования зависит от материала, конструкции детали и того, на какую величину и какие поверхности детали (наружные или внутренние) необходимо восстановить.

Процесс восстановления деталей пластическим деформированием включает предварительную подготовку детали, собственно процесс деформирования детали и, как правило, механическую обработку после деформирования.

Предварительная подготовка детали перед холодным деформированием производится с целью повышения пластических свойств (снижения твердости) материала и облегчения тем самым процесса пластического деформирования. Подготовительная операция представляет собой отпуск или отжиг изделий. Без термической подготовки восстанавливают стальные детали с твердостью менее среднего значения ( $HRC\ 25...30$ ) и детали из цветных металлов. Подготовка детали перед горячим деформированием заключается в предварительном нагреве до температуры  $450...900^{\circ}C$ . Однако при таком термическом воздействии на деталь помимо увеличения пластичности происходит также изменение структуры и физико-механических свойств металла. Поэтому для их восстановления после пластического деформирования деталь дополнительно подвергают упрочняющей термической или химико-термической обработке. Затем деталь механически обрабатывают для получения требуемой точности.

Одним из самых распространенных способов пластического деформирования является осадка (рис. 4.9, *a*). Она применяется для восстановления поперечных размеров деталей за счет уменьшения их высоты. Наиболее простым примером осадки является увеличе-

ние диаметра изношенной наружной поверхности поршневого пальца. Осадку пальца проводят на гидравлическом прессе. Однако проведение осадки без использования приспособлений, ограничивающих пластическое течение материала, приводит к неравномерности деформации по высоте детали, которая проявляется в бочкообразности формы. Неравномерность деформации возникает из-за контактных сил трения на торцах пальца. Для уменьшения погрешности формы изделия перед деформированием под торцы пальца подкладывают свинцовую фольгу с графитовой смазкой. Тем не менее таким образом можно создать только ремонтную заготовку, из которой посредством механической обработки получают изделие с окончательными размерами.

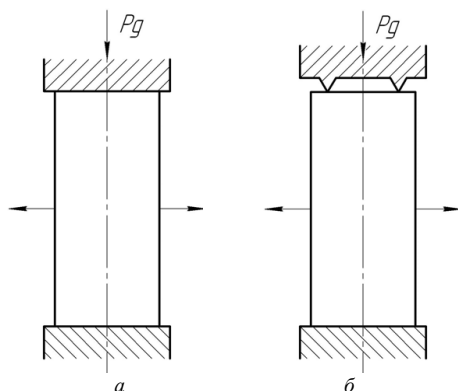


Рис. 4.9. Схемы восстановления размеров изношенных деталей:  
а — осадкой; б — вдавливанием

На рис. 4.10 приведена схема осадки втулки, которую проводят с целью восстановления внутреннего диаметра. Под действием усилия деформирования  $P$  сначала заполняется зазор между восстанавливаемой втулкой и втулкой матрицы, причем заполнение происходит от середины к концам детали. Затем заполняется зазор между восстанавливаемой втулкой и оправкой. Применение при восстановлении специальной оправки дает возможность получить изделие с оконча-

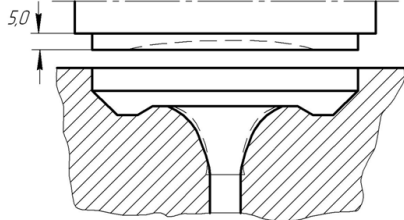


Рис. 4.12. Схема восстановления головки клапана вдавливанием

тельными размерами.

Возможности пластического деформирования при восстановлении втулок ограничиваются величиной допустимого уменьшения их высоты. Для сильно нагруженных втулок уменьшение высоты допускается на 5...8%, для менее нагруженных втулок уменьшение высоты возможно до 15%.

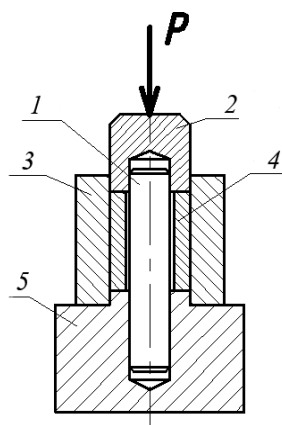


Рис. 4.10. Схема восстановления внутреннего диаметра втулки осадкой:

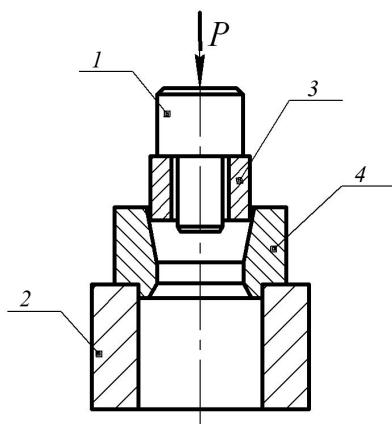


Рис. 4.11. Схема восстановления внутреннего диаметра втулки

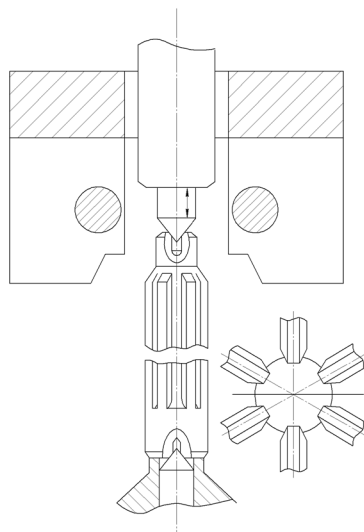


Рис. 4.13. Схема восстановления шлицевой поверхности вала вдавливанием с помощью шлиценакатной головки

1 — оправка; 2 — пуансон; 3 — втулка матрицы; 4 — восстанавливаемая втулка; 5 — матрица

обжатием: 1 — пуансон; 2 — опора; 3 — восстанавливаемая втулка; 4 — калибрующая втулка

Если при восстановлении уменьшение высоты втулки по техническим требованиям недопустимо, то для получения номинального внутреннего размера можно применять обжатие втулки (рис. 4.11).

В этом случае изношенный внутренний диаметр втулки восстанавливается за счет уменьшения наружного диаметра, который может быть впоследствии увеличен, например, путем гальванического наращивания слоя железа или высадки металла при выглаживании наружной поверхности детали.

Вдавливание (рис. 4.9,б) применяют для восстановления головок клапанов (рис. 4.12), зубчатых колес, шлицевых поверхностей различных валов. Так, шлицевую поверхность рекомендуется восстанавливать вдавливанием, если износ по толщине зубьев достигает относительно небольшой величины (до 0,5 мм). Холодным пластическим деформированием с помощью шлиценакатной головки (рис. 4.13) формируют технологическую канавку на нерабочей наружной шлицевой поверхности. Металл, вытесненный из канавки, заполняет боковые изношенные поверхности зуба и увеличивает наружный диаметр вала, обеспечивая минимально необходимый припуск на последующую механическую обработку. Если износ зубьев по толщине составляет 0,5...1,2 мм, тогда на их наружной поверхности продольной наплавкой формируют валики металла (рис. 4.14), который опять же с помощью шлиценакатной головки перемещают на боковые изношенные поверхности зуба. При осадке наплавленный на зубья металл внедряется в основной металл, увеличивая ширину зубьев до размеров, при которых с них может быть удален технологический припуск механической обработкой.

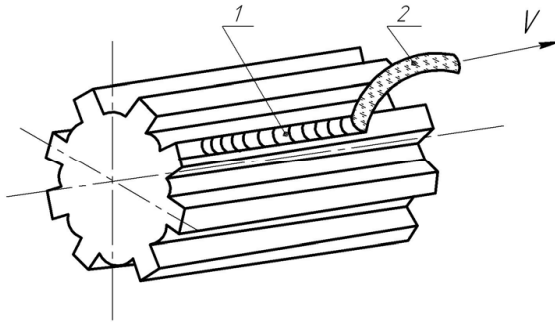


Рис. 4.14. Схема продольной наплавки шлицевой поверхности детали:  
1 – наплавленный слой; 2 – электродная проволока

При восстановлении зубчатых колес горячей объемной штамповкой колесо нагревают и помещают в закрытый штамп. Под давлением металл в пластическом состоянии перемещается из нерабочих участков на изношенные поверхности.

В случае недостаточного запаса металла на нерабочие поверхности зубчатого колеса предварительно наплавляют металл и затем его выдавливают на изношенные участки. Перед осадкой наплавленный венец нагревают токами высокой частоты (ТВЧ) до температуры 1150...1200°С, а после осадки зубчатое колесо подвергают нормализации и прошивке отверстия ступицы на гидравлическом прессе (рис. 4.15). И наконец, механической обработкой доводят изделие до нужных размеров.

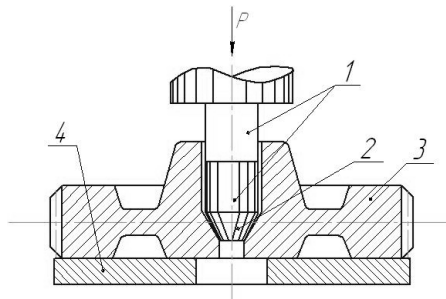
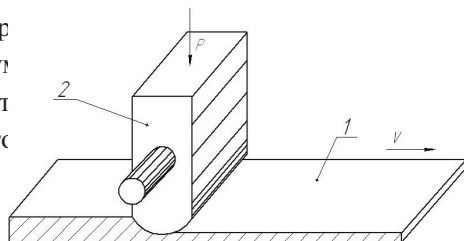


Рис. 4.15. Схема прошивки отверстия ступицы зубчатого колеса на гидравлическом прессе: 1 – надставка; 2 – прошивень;

3 – зубчатое колесо; 4 – опора

Зубчатые колеса также восстанавливают ротационным пластическим деформированием, при котором изношенный зубчатый венец, нагретый ТВЧ, раздается пуансоном или роликами при обкатывании зубчатыми накатниками. Это позволяет сформировать зубчатый венец с минимальными припусками для последующей механической обработки.

Вытяжка проточки за счет упрочнения.  
Например, вытяжка проточки за счет упрочнения. Например, вытяжка проточки за счет упрочнения.



и ширины загиба (рис. 4.16).  
Делают это при о большой запас

Рис. 4.16. Схема восстановления плоской детали вытяжкой:  
1 – деталь; 2 – инструмент

Раздачей восстанавливают наружные размеры детали без существенного изменения ее высоты (рис. 4.17). Так, восстановление поршневых пальцев осуществляют под прессом сферическими или цилиндрическими прошивками, размеры которых превышают внутренние диаметры пальцев на 0,45...0,8 мм. Восстановленные таким образом пальцы подвергают закалке токами высокой частоты ( $HRC\ 58...65$ ) и бесцентровому шлифованию с последующими суперфинишированием и полированием их поверхностей.



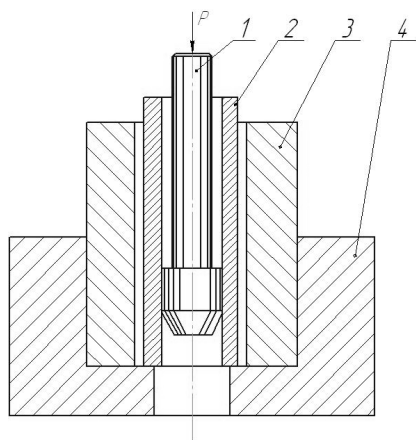


Рис. 4.17. Схема восстановления цилиндрической детали раздачей:  
1 – прошивка; 2 – поршневой палец; 3 – матрица; 4 – основание матрицы

Для восстановления поршневых пальцев также применяют способы термопластического деформирования, совмещающие термическое воздействие на металл с его пластической деформацией. На рис. 4.18 представлен способ восстановления деталей путем горячей раскатки.

Сущность способа заключается в том, что поршневой палец, нагретый до температуры  $790...820^{\circ}\text{C}$ , деформируют нажимным и опорным роликами при их вращательном движении. По мере опускания нажимного ролика происходит утонение стенки пальца при одновременном увеличении его наружного диаметра.

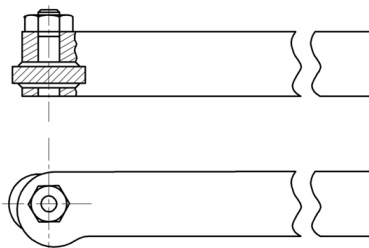


Рис. 4.20. Схема зубчатого ролика

К концу раскатки палец, соприкасающийся с постоянно охлаждаемыми роликами, остывает до температуры  $650^{\circ}\text{C}$  и сбрасывается в бак с водой. Увеличение наружного диаметра пальца при такой обработке может достигать  $0,2...0,8$  мм.

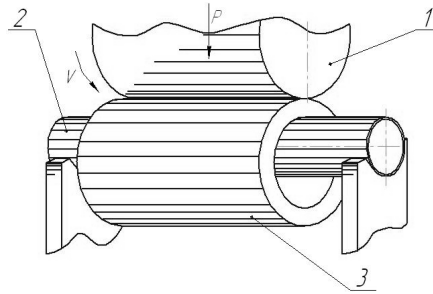


Рис. 4.18. Схема восстановления наружного диаметра поршневого пальца раскаткой: 1 – нажимной ролик; 2 – опорный ролик; 3 – поршневой палец

Восстановление поршневых пальцев можно также осуществлять термоупруго-пластическим деформированием (рис. 4.19), особенностью которого является то, что увеличение наружного диаметра происходит под воздействием пластической деформации без приложения дополнительных внешних сил. Сущность способа заключается в том, что изношенный поршневой палец нагревают в индукторе до температуры 790...830°С. После достижения требуемой температуры нагрев прекращают, зажимают палец по торцам в установке раздачи и быстро охлаждают водой изнутри. Это приводит к образованию больших термических напряжений. Под действием этих напряжений развивается термопластическая деформация, вызывающая течение материала в радиальном направлении. Изменяя параметры теплового воздействия, можно изменять интенсивность пластической деформации материала детали. При этом изменение размера в радиальном направлении может составлять 0,1...0,3 мм. Необходимо отметить, что при таком воздействии на деталь наряду с восстановлением изношенного размера происходит упрочнение материала изделия закалкой.

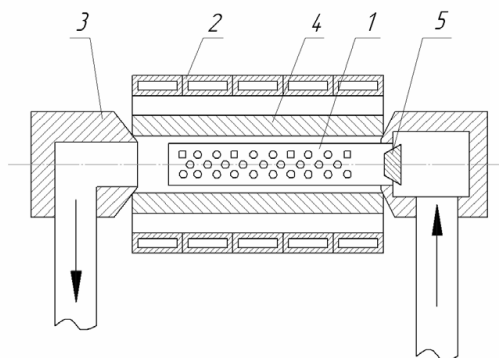


Рис. 4.19. Схема восстановления наружного диаметра поршневого пальца термоупруго-пластическим деформированием: 1 – спрейер; 2 – индуктор; 3 – втулка; 4 – поршневой палец; 5 – гидроклапан

Увеличение диаметров посадочных поверхностей валов под подшипники, шкивы, зубчатые колеса и др. может быть произведено способами поверхностного пластического деформирования, такими как накатывание зубчатым роликом, выглаживание или электрохимическая обработка. Накатывание осуществляют на токарном станке специальным инструментом – зубчатым роликом (рис. 4.20), установленным в специальной оправке, зажимаемой в резцедержателе. При поджиге ролика к вращающемуся валу зубцы ролика внедряются в изношенную поверхность, образуя на ней лунки. По контуру лунок образуются наплывы вытесненного металла, что приводит к увеличению диаметра посадочной поверхности вала.

Детали высокой точности пневмо- и гидроагрегатов достаточно сложны в конструктивном исполнении, изготавливаются из дорогостоящих материалов и требуют особых технологий восстановления. Износ деталей в плунжерной паре насоса высокого давления на 2...3 мкм приводит к снижению коэффициента полезного действия насоса на 30%. Восстановление таких деталей традиционными методами – напылением, а тем более наплавкой недопустимо, так как после восстановления существенно изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя. Поэтому для восстановления таких деталей рекомендуется применять алмазное выглаживание. Этот способ позволяет восстановить изношенные размеры путем форми-

рования регулярного микрорельефа поверхности.

Сущность способа заключается в увеличении наружного или уменьшении внутреннего диаметра за счет высадки металла (рис. 4.21). При скольжении по изношенной цилиндрической поверхности индентора (инструмента) на ней образуется след в виде канавки глубиной  $h_k$ , по обеим сторонам которой формируются наплывы вытесненного металла высотой  $h_n$ . При этом происходит увеличение диаметра валов или уменьшение диаметра отверстий втулок на величину  $2h_n$ .

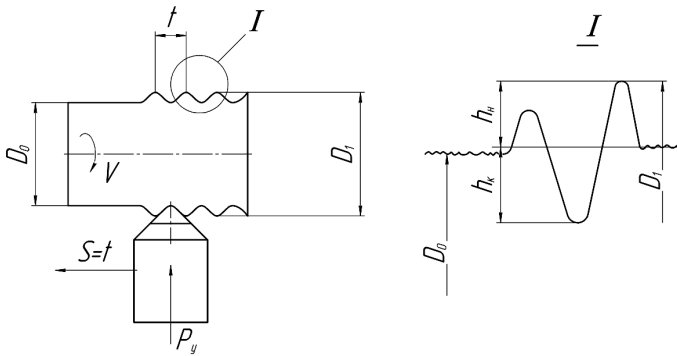


Рис. 4.21. Схема высадки металла при выглаживании

Восстановление осуществляют на токарном станке. Изношенную деталь устанавливают в центрах, а устройство для алмазного выглаживания – в резцедержателе станка. При обработке детали и инструменту задают точно такие же формообразующие движения, как при нарезании резьбы с крупным шагом. В результате на поверхности образуется регулярный микрорельеф, состоящий из профильных винтовых канавок и выступов.

Для повышения точности диаметрального размера и увеличения площади опорной поверхности (площадь опорной поверхности не должна быть меньше 60% от ее номинального значения) можно производить второй проход, на котором осуществляют осадку наплывов цилиндрическим индентором (рис. 4.22). При этом формируется система полужакрытых каналов в виде ласточкиного хвоста, позволяющая устранить действие абразивных частиц и увеличить маслосъемность поверхности. Эффективность работы такой поверхности проявляется

также в контакте с различного рода уплотнительными элементами.

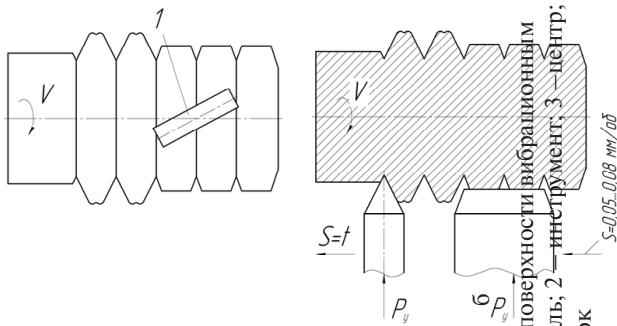
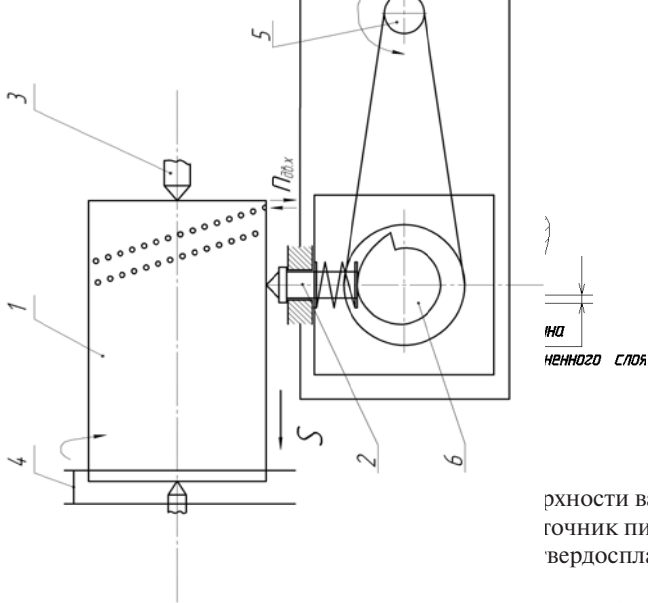


Рис. 4.22. Схема осадки напылов цилиндрическим индентором

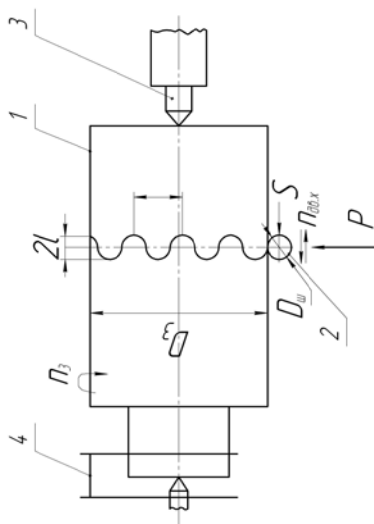
Необходимо отметить, что высота напыла  $h_n$  при алмазном выглаживании не превышает 30 мкм, что, безусловно, ограничивает технологические возможности способа.

Для восстановления изношенной поверхности детали с повышенной твердостью и увеличения высоты напыла применяют электро-механическую обработку. Сущность процесса электро-механической высадки металла такая же, как при алмазном выглаживании. Особенностью способа электро-механической высадки металла является то, что через зону контакта инструмента с деталью пропускают электрический ток, который разогревает металл до температуры 850...900°C и тем самым облегчает его пластическую деформацию (рис. 4.23). В качестве инструмента используют специально заточенную пластину или ролик, которые изготавливают из твердого сплава. Источником питания служит сварочный трансформатор переменного тока, который позволяет плавно изменять силу тока. После увеличения диаметра вала на 0,4...0,7 мм за счет напылов проводят шлифование или электро-механическое выглаживание широкой твердосплавной пластиной для получения требуемого размера под посадку подшипника. В результате на изношенной поверхности образуется остаточный рельеф в виде выступов и полузакрытых канавок.

Рис. 4.23. Схема формирования напыла на цилиндрической поверхности вибрационным электро-механическим способом. 1 — деталь; 2 — инструмент; 3 — центр; 4 — лучок



рхности вала методом  
 гочник питания; 2 – вал;  
 вердосплавная пластина



иаметр вала выполняют  
 зовой детали, поскольку  
 ению сформированного  
 зысокой демпфирующей  
 м направлениях. Восста-  
 і посадочные поверхнос-  
 зтью, фреттингстойкос-  
 чно хорошо удерживают  
 та трения в контакте вала  
 кта, а от величины натя-

для формирования регу-  
 ения эксплуатационных  
 го поверхностного плас-  
 тие, виброраскатывание,

Их суть заключается в том, что в результате сложного относительного перемещения деформирующего инструмента (например, шара) относительно обрабатываемой поверхности на ней выдавливаются по определённому заданному рисунку и форме канавки, между которыми сохраняется первичный микрорельеф поверхности или создаётся

новый микрорельеф (рис. 4.25). Низкочастотная вибрация инструмента в процессе обработки позволяет весьма точно и в больших пределах регулировать размерные параметры регулярного рельефа, взаиморасположение его неровностей, а также изменять в нужную для эксплуатации сторону физико-механические свойства материала поверхностного слоя.

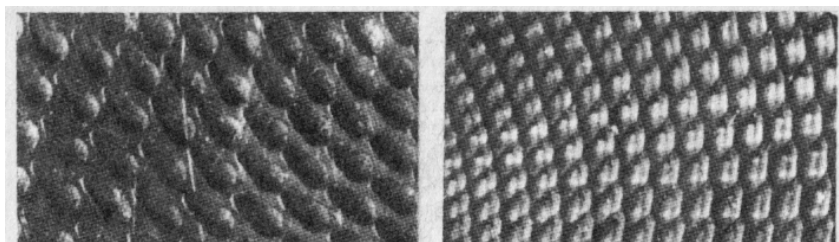


Рис. 4.25. Вид поверхностей, обработанных методами вибрационного пластического деформирования

На поверхности детали можно получать разнообразный и сложный профиль микрорельефа, который зависит от соотношения технологических параметров процесса виброобработки (например, от соотношения числа двойных ходов  $n_{дв.х}$  и частоты вращения заготовки  $n$ ).

В процессе виброобработки на поверхности образуется система смазочных канавок и карманов, которая дает возможность оптимизировать площадь контакта и повысить маслоёмкость поверхности. При этом существенно улучшаются все физико-механические характеристики поверхностного слоя. Значительное упрочнение материала поверхностного слоя при виброобкатывании достигается в результате того, что деформирующий инструмент «атакует» каждый выступ микронеровностей исходной поверхности с различных сторон, как бы раскатывая металл в разных направлениях.

Обычно для создания системы масляных канавок вибрационное обкатывание производят шариками диаметром не менее 3...4 мм. Но обработку деталей, изготовленных из вязких материалов, выполняют с меньшими усилиями деформирования и диаметрами шариков (1...2 мм).

Микрорельеф, сформированный виброобработкой, повышает плавность работы подвижного сопряжения за счет снижения коэффициента трения в 1,6...2,2 раза. При сухом трении канавки работают

как ловушки, задерживающие в себе продукты износа, пыль и абразивные частицы, благодаря чему устраняется их абразивное действие.

Создание регулярного микрорельефа на обеих поверхностях пары трения (например, гильза – поршень) повышает износостойкость сопряжения в среднем в 2 раза. Но при этом важно помнить, что отделочно-упрочняющую обработку необходимо применять обоснованно, чтобы повышалась износостойкость наиболее слабого звена пары трения. Нарушение этого правила вместо повышения долговечности узла трения может привести даже к снижению его ресурса.

Пластическое деформирование используют в ремонтном производстве не только для восстановления формы и размеров детали, но и как отделочно-упрочняющую обработку, которую проводят для повышения качества поверхностного слоя деталей, а именно для повышения твердости, формирования остаточных напряжений сжатия и создания оптимальной шероховатости поверхности. В зависимости от вида деформирующего инструмента и характера контакта с поверхностью детали различают статические, динамические и комбинированные способы поверхностного пластического деформирования. При выборе способа учитывают форму и размеры детали, жесткость и прочность её материала, а также требования к точности обработки.

В статических способах отделочно-упрочняющей обработки (обкатывание, раскатывание, алмазное выглаживание, дорнование и др.) деформирующими элементами являются шарики, ролики, алмазные инденторы, дорны, которые при обработке находятся в непрерывном контакте с поверхностью детали и оказывают на нее постоянное воздействие с определенным усилием деформирования.

В основе динамических способов отделочно-упрочняющей обработки лежат ударные воздействия на поверхность детали деформирующих элементов в виде металлической, стеклянной дроби или микрошариков. Эти способы с успехом применяют для упрочнения поверхностей деталей сложной конфигурации.

Комбинированные способы объединяют статические или динамические способы поверхностного пластического деформирования с химическими или термическими воздействиями на материал изделий.

Способы поверхностного пластического деформирования повышают эксплуатационные свойства изделий – износостойкость, уста-



лостную прочность, фреттингстойкость, контактную жесткость и др. Таким образом, методы поверхностного пластического деформирования в определенной мере заменяют энергоемкие методы термического и химико-термического упрочнения, применение которых в условиях ремонтного производства бывает весьма проблематично.

#### *Контрольные вопросы*

1. Какие способы объемного и поверхностного пластического деформирования восстановления деталей вы знаете?
2. На каких основных положениях основаны способы восстановления деталей объемным пластическим деформированием?
3. Как восстановить внутренний диаметр втулки способами пластического деформирования?
4. Каким образом можно восстановить посадку обоймы подшипника качения на валу, не используя никаких дополнительных материалов для наращивания диаметра вала?
5. Какими способами можно получить на поверхности детали регулярный микрорельеф?

## **4.2. Восстановление деталей сваркой и наплавкой**

### **4.2.1. Устранение дефектов деталей сваркой**

Сварка и наплавка являются наиболее распространенными технологическими способами, применяемыми в ремонтном производстве при восстановлении деталей.

Сваркой называется процесс получения неразъемного соединения металлических изделий местным сплавлением или давлением (в этом случае применяется термин «наварка»).

Ремонтную сварку используют для устранения различного рода дефектов локального характера, таких как трещины, сколы, изломы, пробоины. Эти дефекты являются типичными повреждениями у рамы, картеров коробки передач, передних и задних мостов, элементов рулевого управления, кузова, кабины автомобиля и др. В большинстве случаев ремонтируемые изделия восстанавливаются сваркой электрической дугой.

Процесс ремонтной сварки характеризуется интенсивным теп-

ловложением в изделие с глубиной провара практически на всю толщину дефектного участка. При этом основным затруднением на пути получения качественного сварного соединения является образование трещин в шве и околошовной зоне.

Для получения высокого качества ремонтируемых деталей необходимо учитывать важное свойство материалов, из которых они изготовлены, – свариваемость. *Свариваемость* – это совокупность технологических характеристик, которые позволяют обеспечить надежное, равнопрочное с основным металлом сварное соединение, без трещин в металле шва и околошовной зоны. Свариваемость зависит от физико-химических свойств свариваемых металлов, способа и режима сварки, режимов подогрева и охлаждения места сварки, составов присадочного материала, флюса, покрытия электрода, защитного газа и др. При сварке соединяемые металлы и присадочный материал должны быть либо идентичны по химическому составу, либо должны обладать одинаковой основой, которая обеспечивает полную металлургическую совместимость.

Качественная оценка свариваемости металлов и сплавов, а также влияние на нее отдельных химических элементов сводится к следующему:

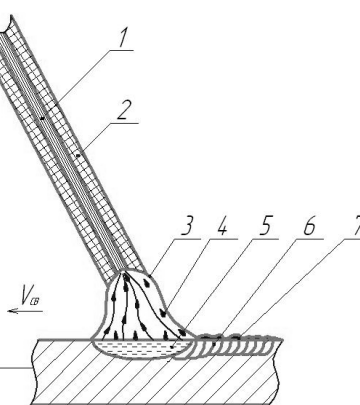
- хром при сварке образует карбиды, ухудшающие коррозионную стойкость стали, но при этом резко повышающие твердость в зонах термического влияния. Хром также содействует образованию тугоплавких окислов, затрудняющих процесс сварки;
- никель увеличивает пластические и прочностные свойства стали, способствует образованию мелкозернистой структуры наплавленного металла;
- молибден дает возможность существенно повысить несущую способность стали при ударных нагрузках и повышенных температурах, а также получить мелкозернистую структуру металла шва. Однако молибден инициирует появление трещин в наплавленном металле и околошовной зоне. В процессе сварки, наплавки молибден склонен к выгоранию и образованию окислов;
- ванадий способствует образованию закалочных структур в сталях, которые затрудняют сварочные процессы. В процессе сварки ванадий активно окисляется и выгорает;

- благодаря вольфраму происходит значительное повышение твердости и износостойкости сталей даже при высоких температурах, но при этом образующиеся окисные пленки сильно затрудняют сварочные процессы;
- углерод при содержании в сталях более 0,35% резко ухудшает их свариваемость; приводит к образованию закалочных структур, трещин и пористости;
- марганец при малом содержании в сталях (до 0,8%) существенного влияния на сварочные процессы не оказывает, но при большем содержании способствует образованию закалочных структур и трещин;
- кремний при большом его содержании (более 0,8%) в сталях аналогично марганцу оказывает негативное влияние на сварочные процессы вследствие образования тугоплавких окислов и повышения жидкотекучести высококремнистых сталей;
- титан и ниобий затрудняют свариваемость коррозионно-стойких сталей (12Х18Н9Т и др.) и способствуют образованию горячих трещин.

Необходимо отметить, что лучшей свариваемостью обладают малоуглеродистые стали, а худшей – чугун и алюминиевые сплавы. Поэтому сварка чугуна и алюминиевых сплавов требует применения особых технологических приемов.

Большое разнообразие  
необходимость  
способов сварки

Наибольшее  
вреждений под  
дуговой сварке  
дуга горит с электродом,  
расплавляя металл  
(рис. 4.26). Основание  
сталлизуясь, образуются



и обуславливает  
существование различных

различных по-  
лучной электро-  
дами сварочная  
ланые кромки,  
ытия электрода  
е металлы, кри-

Рис. 4.26. Схема электродуговой сварки покрытым металлическим электродом: 1 – электродный стержень; 2 – электродное покрытие; 3 – сварочная дуга; 4 – капли металла стержня; 5 – ванна расплавленного металла; 6 – металл сварного шва; 7 – шлак

Электрод состоит из стержня и электродного покрытия. Электро-

дный стержень — это сварочная проволока, которая по своему химическому составу должна быть наиболее близкой к составу основного металла, в противном случае механические характеристики сварного соединения могут быть неудовлетворительными. Электродное покрытие — многокомпонентная смесь металлов и их оксидов, которая при ее плавлении создает газовую и шлаковую защиту металла сварочной ванны от воздействия атмосферы. Состав наплавляемого металла можно изменять с помощью легирующих компонентов электродного покрытия. Наличие в покрытии кремния и марганца способствует раскислению металла сварочной ванны и его легированию, придавая шву более высокие физико-механические свойства.

При сварке металл ванны подвергается воздействию окружающего воздуха и под влиянием высоких температур происходит его насыщение кислородом, азотом и водородом. Реакции металла с этими газами приводят к образованию нежелательных химических соединений в виде окиси железа  $FeO$ , окиси железа  $Fe_2O_3$ , нитридов железа  $Fe_2N$ ,  $Fe_4N$  и др., а также выгоранию легирующих элементов.

Питание дуги осуществляется от источника постоянного (выпрямителя) или переменного тока (сварочного трансформатора). Электрическая дуга постоянного тока горит более стабильно. Кроме того, сварку на постоянном токе можно проводить при прямой или обратной полярности, присоединяя в первом случае к детали «плюс» источника питания, а во втором — «минус». Обратная полярность позволяет уменьшить глубину проплавления основного металла, так как на положительном электроде выделяется тепла на 20% больше, чем на отрицательном. Поэтому детали толщиной менее 3 мм необходимо сваривать на постоянном токе обратной полярности, чтобы избежать прожогов.

*Преимущества электродуговой сварки покрытыми электродами:*

- универсальность и технологическая гибкость при выполнении ремонтных работ;
- простота и доступность оборудования и технологии;
- возможность получения наплавляемого слоя любой системы легирования.

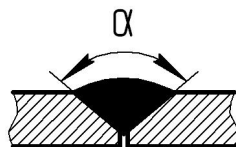


Рис. 4.27. Схема заварки трещины

*Недостатки электродуговой сварки покрытыми электродами:*

- низкая производительность и тяжелые условия труда;
- нарушение результатов предшествующей термической обработки;
- низкое качество металла наплавленного слоя, происходящее вследствие окисления и выгорания легирующих элементов;
- большая глубина проплавления основного металла и, как следствие, коробление изделий.

Перед заваркой с целью исключения развития трещины ее концы засверливают сверлом диаметром 3...6 мм (диаметр сверла выбирают в зависимости от толщины детали). Кромки трещины разделяют под углом  $\alpha$ , равным 120...140°, получая таким образом V-образную канавку шириной более 3 мм, которая позволяет наиболее полно связать разделенные трещиной части детали (рис. 4.27). Кроме того, для получения сварного шва с высокими механическими свойствами необходимо разделить глухую (несквозную) трещину на всю толщину детали, так как попытка заварить глухую трещину сопровождается выходом из глубины трещины газов, которые разрывают расплавленный металл сварного шва.

Для получения качественного сварного соединения требуется правильно выбрать параметры режима сварки. Так, диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла. При сварке деталей толщиной до 4 мм диаметр электрода должен равняться толщине деталей. Сила сварочного тока определяется значением допустимой плотности тока, которая, в свою очередь, зависит от толщины свариваемого металла, скорости сварки, диаметра электрода, вида его покрытия, положения шва в пространстве.

Заварку трещин и других подобных дефектов рекомендуется производить в полувертикальном положении (рис. 4.28), ведя процесс снизу вверх в направлении выхода дефекта, заполняя при этом металлом всё сечение разделки.

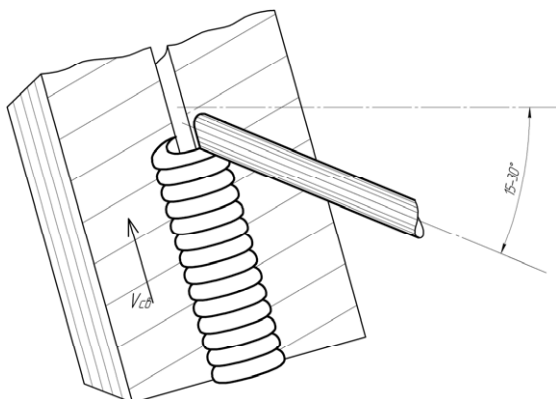


Рис. 4.28. Схема заварки трещины в полувертикальном положении

В зависимости от длины трещины различают следующие виды швов: короткие (250...300 мм), сварка которых ведется напроход, т. е. сварку начинают на одном конце дефекта и заканчивают на другом (рис. 4.29); средние (350...1000 мм), сварка которых ведется от середины к краям дефекта; длинные (более 1000 мм), сварка которых ведется обратно-ступенчатым способом.

В зависимости от размеров сечения швы бывают однослойными (однопроходными) или многослойными (многопроходными) (рис. 4.30). Однослойная сварка производительна и экономична, но металл шва получается недостаточно пластичным вследствие увеличения зоны перегрева. В случае многослойной сварки каждый нижележащий валик проходит термообработку при наложении следующего шва, что позволяет получать измельченную структуру металла шва и высокие механические свойства сварочного соединения.

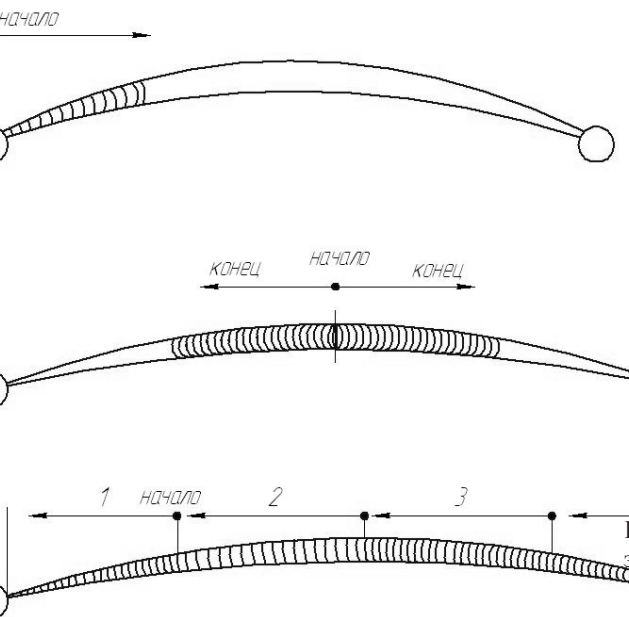


Рис. 4.29. Схемы заварки короткой, средней и длинной трещины



Рис. 4.31. Последовательность заварки трещины в корпусной детали

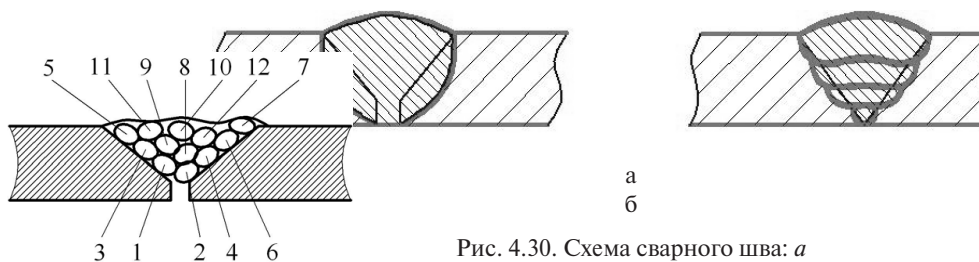


Рис. 4.32. Схема заварки чугунной трещины методом отжигающих валиков (цифрами условно показана последовательность наложения валиков)

Рис. 4.30. Схема сварного шва: а — однослойный; б — многослойный

Расположение слоев при многослойной сварке бывает двух видов: последовательное наложение каждого слоя по всей длине шва «каскадным» способом (рис. 4.30, б) и наложение швов способом отжигающих валиков, или «горки» (рис. 4.32). Оба этих способа применяют при сварке металла значительной толщины (свыше 20...25 мм).

Качество сварного шва, как говорилось ранее, во многом зависит от химического состава основного металла. Например, для чугуна оно зависит от концентрации углерода и кремния, которые оказывают большое влияние на процесс отбеливания чугуна. Отбеливание чугуна происходит при быстром охлаждении наплавленного металла и выгорании кремния. В таких условиях углерод не успевает выделиться в виде графита и остается в химически связанном состоянии в виде цементита. В результате сварной шов получается очень твердым и хрупким с большими остаточными напряжениями, которые, как правило, приводят к образованию трещин как самого шва, так и околошовной зоны.

Электродуговая сварка чугуна производится специальными электродами, содержащими медь или никель, на постоянном токе обратной полярности («плюс» на электроде, «минус» на детали). Заварку трещины проводят короткими участками, которые сваривают в определенной последовательности (рис. 4.31), обеспечивающей образование минимальных остаточных напряжений.

Глубокие трещины могут быть заварены тонкими стальными электродами или самозащитными присадочными проволоками марок ПАНЧ-11, МНЧ-1, АНЧ-1, ОЗЧ-1 и др. Достоинством последних является возможность их применения без покрытия, флюсовой или газовой защиты. Заварку трещины производится по способу отжигающих валиков, при котором швы накладываются вдоль трещины по ее разделанным кромкам с последующим смыканием. При этом на заключительном этапе происходит заварка, по сути, не чугунных, а стальных поверхностей (рис. 4.32).

При таком способе заварки каждый последующий валик, воздействуя термически на предыдущий, уменьшает его твердость и снимает остаточные напряжения в шве, обеспечивая надежное устранение трещины чугунной корпусной детали.

В большинстве случаев для корпусных чугунных деталей сварку применяют только с целью обеспечения герметичности. Более того, если трещины проходят через зоны детали, которые подвержены воздействию внешних нагрузок, то такие детали не подлежат восстановлению – они просто выбраковываются.

Одним из самых распространенных технологических способов устранения дефектов деталей является также ремонтная газовая сварка.





Газовая сварка основана на использовании тепла, выделяющегося при сгорании горючих газов (ацетилен, природных пропано-бутановых смесей, паров бензина и др.) в среде кислорода.

Для получения сварного шва с высокими механическими свойствами при газовой сварке необходимо хорошо подготовить свариваемые кромки, правильно подобрать мощность горелки, отрегулировать сварочное пламя, выбрать присадочный материал, установить положение горелки и направление ее перемещения по свариваемому шву.

При газовой сварке пламя направляют на свариваемые кромки так, чтобы они находились на расстоянии 2...6 мм от конца ядра пламени. Конец присадочного прутка при этом может находиться в сварочной ванне или на некотором расстоянии от нее. Угол наклона горелки зависит от толщины свариваемых кромок и теплопроводности металла. Чем толще металл и выше его теплопроводность, тем больше должен быть угол наклона горелки. Это способствует введению большего количества теплоты в основной металл.

Различают два основных способа газовой сварки – правый и левый. При правом способе (рис. 4.33,а) процесс сварки ведется слева направо. Горелка перемещается впереди присадочного прутка, а пламя направлено на формирующийся шов. Этим обеспечиваются хорошая защита сварочной ванны от воздействия воздуха и медленное охлаждение металла шва. Такой способ применяют при сварке металла толщиной более 5 мм, так как он характеризуется большим тепловложением в основной металл. При сварке этим способом швы получаются высокого качества. При левом способе (рис. 4.33,б) процесс сварки производится справа налево. Горелка перемещается за присадочным прутком, а пламя, направленное на свариваемые кромки, подогревает их, подготавливая таким образом к сварке. В этом случае шов получается равномерным по высоте и ширине, что особенно важно при сварке тонких стенок детали.

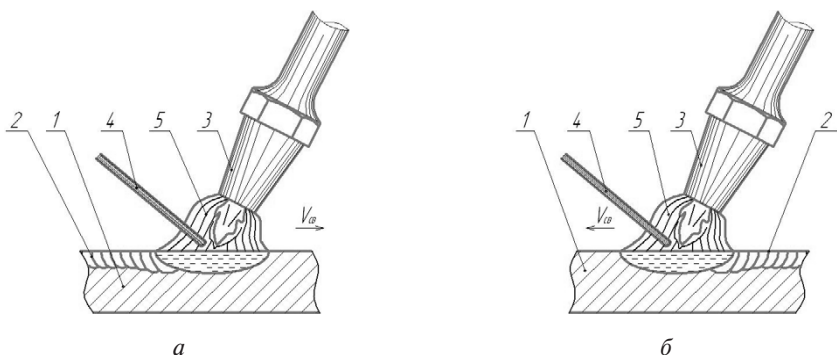


Рис. 4.33. Схемы основных способов газовой сварки:  
*a* – правый; *б* – левый (1 – деталь; 2 – наплавленный слой; 3 – горелка;  
 4 – присадочный пруток; 5 – пламя горелки)

Газовую заварку трещины чугунной корпусной детали осуществляют ацетиленокислородным пламенем. В качестве присадочного материала обычно используют специальные чугунные прутки. Перед сваркой производят общий подогрев детали до температуры 650...680°С, а при газовой заварке – местный нагрев до температуры не менее 500°С. При этом трещину накрывают специальным защитным кожухом, в котором имеется небольшое окно для доступа к месту сварки. Такая защита позволяет предотвратить появление закалочных структур в околошовной зоне.

Горячая сварка чугуна дает возможность получить прочность шва, равноценную прочности основного металла. Однако это трудоемкий процесс, который можно осуществить только в условиях специализированных ремонтных предприятий.

Трудность сваривания алюминия и его сплавов обусловлена следующими факторами.

1. Образование на поверхности сварочной ванны тугоплавкой окисной пленки  $Al_2O_3$ , которая не дает возможность вступить расплавленному присадочному материалу в контакт с основным. При этом расплавленный присадочный материал, имеющий такую же пленку, сворачивается в шарик и скатывается с поверхности расплавленного металла.

2. Высокая вероятность проваливания под действием собственного веса свариваемого металла, обусловленного низкой прочностью алюминия при высоких температурах.

3. Образование пор и раковин в металле шва, которое обусловлено процессом выделения водорода из расплавленного металла. Водород при быстром охлаждении металла полностью не успевает покинуть сварочную ванну.

4. Повышенная склонность металла шва к возникновению трещин вследствие образования грубой столбчатой структуры металла шва и выделением по границам зерен легкоплавких эвтектик. Негативное влияние на процесс трещинообразования оказывает также большая усадка расплавленного металла (7%), приводящая к возникновению больших остаточных напряжений в ремонтируемом сваркой изделии.

Для получения качественного шва при сварке алюминиевых сплавов прежде всего необходимо удалить окисную пленку с поверхностей соединяемых кромок и присадочной проволоки. Это достигается так называемым катодным распылением в атмосфере инертного газа – аргона или растворением в специальном флюсе, содержащем фториды щелочных металлов, например криолита  $Na_3AlF_6$ , который превращает окись алюминия в легкоплавкое комплексное соединение – шлак. Наряду с растворением окисных пленок криолит изменяет поверхностное натяжение металла, способствуя мелкокапельному переносу присадочного металла. Остатки флюса и шлака, являющиеся едкими щелочами, вызывают коррозию алюминия, поэтому после сварки их следует смыть горячей водой. Кроме того, необходимо проводить предварительный и сопутствующий нагревы до температуры 150...250°C, которые позволяют замедлить кристаллизацию металла сварочной ванны. В результате водород из растворенного металла будет выделяться более полно, а значит, уменьшится пористость.

Алюминий и его сплавы можно сваривать разными способами: в среде инертного газа неплавящимся электродом или плавящимся электродом на основе алюминия, а также трехфазной дугой неплавящимися электродами, электродом с покрытием, ацетиленокислородным пламенем с применением специальных флюсов.

Одним из надежных способов восстановления алюминиевых деталей является способ аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. В качестве неплавящегося электрода преимущественно используют стержни из вольфрама. При аргонодуговой сварке соединяемые кромки детали и присадочный материал нагреваются теплом электри-

ческой дуги, образующейся между вольфрамовым электродом и деталью (рис. 4.34). При этом из сопла наконечника горелки непрерывно подается аргон, который, окружая дугу, создает сосредоточенный нагрев и предохраняет расплавленный металл шва от вредного влияния кислорода и азота воздуха. В результате условия плавления металла улучшаются, а качество шва получается достаточно высоким.

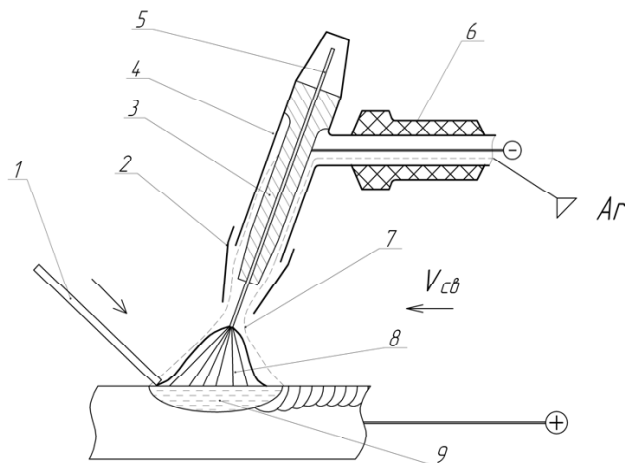


Рис. 4.34. Схема аргонодуговой сварки неплавящимся электродом:  
 1 — присадочный пруток; 2 — сопло; 3 — токоподводящий мундштук;  
 4 — корпус горелки; 5 — неплавящийся электрод; 6 — рукоятка горелки;  
 7 — атмосфера защитного газа; 8 — сварочная дуга; 9 — сварочная ванна

Необходимо отметить, что при аргонодуговой сварке физико-механические свойства наплавленного металла лучше, а пористость меньше, чем при электродуговой сварке. При этом практически отсутствуют шлаковые включения в металле шва и коробление деталей. Примечательно, что при аргонодуговой сварке отпадает необходимость применения электродных покрытий и флюсов.

Кроме высокого качества сварного шва аргонодуговая сварка позволяет обеспечить высокую производительность процесса и возможность сварки тонкостенных конструкций.

Наиболее эффективным способом в решении задачи обеспечения технологической прочности сварного соединения и снижения уровня остаточных деформаций при ремонтной сварке изделий из

алюминиевых сплавов является способ сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона (рис. 4.35). Трехфазная дуга представляет собой факел, в котором горят три отдельные дуги переменного тока. Во-первых, это межэлектродная дуга, во-вторых, дуги, горящие между каждым из двух электродов и деталью. Подключение сварочного трансформатора по схеме «открытый треугольник» позволяет получить силу тока, протекающего через деталь, в 1,7 раза больше, чем сила тока на каждом из электродов. Таким образом, при равных значениях силы тока на электроде при трехфазной и однофазной «обычной» аргонодуговой сварке мощность первой существенно выше. Отличительной особенностью горения трехфазной дуги является возможность регулирования силы тока в детали без изменения тока на электродах путем включения в цепь изделия балластного активно-го сопротивления. Это обстоятельство позволяет проводить процесс наплавки при небольшом значении тока в детали (до 10 А), что при других способах практически невозможно. Важным преимуществом процесса наплавки трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона является возможность подключения присадочной проволоки в среднюю фазу источника питания вместо изделия. Такая схема подключения позволяет в широких пределах регулировать тепловой режим процесса наплавки путем перераспределения сварочного тока, протекающего через основной металл, на сварочную проволоку. В результате разделения мощности теплового потока от дуги между основным и присадочным металлами удается достичь высокой технологической прочности сварного соединения.

К недостаткам однофазной и трехфазной сварки неплавящимися электродами в среде аргона в первую очередь следует отнести дороговизну этих процессов. Так, стоимость однофазной аргонодуговой сварки примерно в три раза превышает стоимость ацетиленокислородной.

Устранение пробоин в корпусных деталях в большинстве случаев осуществляют ацетиленокислородной сваркой с использованием специального флюса, который вступает в реакцию с окислами алюминия и образует легкие шлаки, всплывающие из расплавленного металла. В качестве присадочного материала используют специальные прутки или куски алюминия, которые также применяют для предотвращения вытекания из сварочной ванны расплавленного металла. При этом для

герметизации пробоины используют асбестовую подкладку (рис. 4.36).

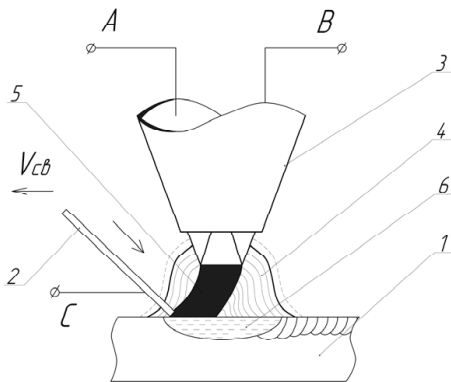


Рис. 4.35. Схема сварки трехфазной дугой неплавящимся электродом: 1 – деталь; 2 – присадочная проволока; 3 – сварочная горелка; 4 – газокINETическая составляющая дуги; 5 – электродинамическая составляющая дуги; 6 – сварочная ванна

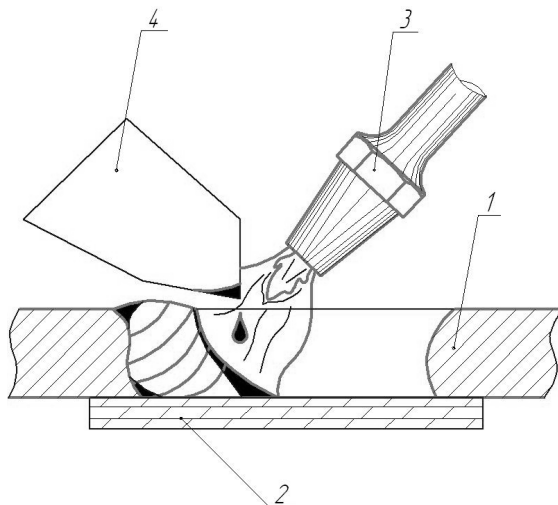


Рис. 4.36. Устранение пробоины корпуса газовой сваркой: 1 – корпус с пробоиной; 2 – асбестовая прокладка; 3 – горелка; 4 – кусок силумина

Сварку начинают с прогрева до температуры 250...300°С прилегающих к пробоине участков корпусной детали и удерживаемого клещами куска присадочного материала. Далее кромки пробоины посыпают

флюсом, окунают во флюс присадочный материал и начинают сплавлять его с кромками стенок детали. После заполнения всей пробоины металлом производят медленное охлаждение, которое исключает образование пор в расплавленном металле.

#### *Контрольные вопросы*

1. Почему сварка чугуна более проблематична, чем сварка малоуглеродистой стали?
2. Какие особенности следует учитывать при сварке алюминиевых сплавов?
3. От чего зависит свариваемость материалов?
4. Какую функцию выполняет электродное покрытие в процессе электродуговой сварки?
5. Как осуществляют заварку трещин?
6. Для чего производят подогрев детали перед сваркой?

#### **4.2.2. Восстановление деталей наплавкой**

Достаточно большую долю в общем объеме работ по восстановлению деталей на ремонтных предприятиях составляют способы наплавки. Так, наплавка под слоем флюса составляет 32%, наплавка в среде углекислого газа – 20%, вибродуговая наплавка – 12%, наплавка порошковой проволокой без флюсовой или газовой защиты – 10% и плазменная наплавка – 1,5%.

Наплавка является разновидностью сварки и заключается в том, что на поверхность исходной заготовки наносят слой расплавленного металла. В большинстве случаев наплавку используют для восстановления первоначальных размеров и формы изношенных изделий. Однако в некоторых случаях она применяется в качестве упрочняющей обработки при изготовлении новых (биметаллических) деталей, позволяющей заменить в изделиях высоколегированные стали угле-

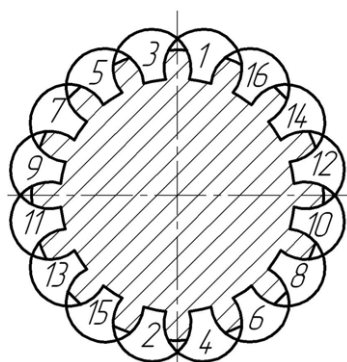


Рис. 4.37. Схема продольной наплавки шлицевой поверхности детали способом уравновешивающих валиков

родистыми путем наплавления на них высоколегированного износостойкого слоя. Она позволяет получить на поверхности деталей слой необходимой толщины и нужного химического состава, обладающего высокой твердостью и износостойкостью. Толщину наплавленного слоя назначают в зависимости от условий работы деталей и предельно допустимой величины износа рабочих поверхностей. Для деталей, работающих на истирание, толщина наплавленного слоя не должна превышать 4 мм, а в условиях ударных нагрузок – 2 мм.

Практически при всех способах наплавки необходимо стремиться к увеличению высоты наплавленного слоя за один проход и снижению глубины проплавления основного металла, так как большая глубина проплавления недопустима из-за высокой вероятности образования больших остаточных напряжений и деформаций.

Для снижения остаточных напряжений и деформаций, особенно в ответственных деталях, применяют различные технологические приемы. К ним относится отжиг при температуре 600...850°С с последующим охлаждением вместе с печью или отпуск при температуре 400°С с выдержкой при этой температуре в течение 3 часов и охлаждением на воздухе, применение предварительного подогрева детали перед наплавкой до температуры 200...350°С. Кроме того, наплавочные работы необходимо проводить исходя из условий бездеформационной обработки (см. раздел 1.6.2). Так, следует избегать наплавки излишнего металла, с тем чтобы получить минимальный припуск на механическую обработку, который позволит уменьшить уровень остаточных напряжений и деформаций. При продольной наплавке цилиндрических деталей нужно применять способ уравнивающих валиков (рис. 4.37). После наложения первого валика вдоль оси детали, как правило, возникает остаточная деформация изгиба. Для ее устранения накладывают второй валик, повернув деталь на 180° вокруг оси. Поворачивая каждый раз деталь для наложения очередного валика, можно добиться минимальных остаточных деформаций изделия.

Решающее значение для получения необходимых эксплуатационных свойств восстанавливаемых изделий имеют правильно выбранные наплавочный материал и способ наплавки. Так, для повышения износостойкости при механическом изнашивании необходимо мак-



симальное повышение твердости рабочих поверхностей, для устранения теплового изнашивания – повышение жаростойкости, а для предупреждения повреждаемости в результате схватывания необходимо вести наплавку присадочным материалом, обладающим малой склонностью к схватыванию.

При наплавке слоя с особыми свойствами необходимо учитывать, что наплавленный металл вследствие перемешивания с основным металлом и взаимодействия с атмосферой дуги отличается по составу от электродного металла. Доля основного металла в наплавленном слое обычно выражается в процентах и колеблется в широких пределах, зависящих от способа и режима наплавки (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Сравнительная характеристика способов наплавки

Способы наплавки	Производительность, кг/ч	Доля основного металла, %	Толщина наплавленного слоя, мм
Газовая с присадкой прутков или проволоки	0,5...1,5	1,0	0,8...5,0
Газопорошковая	0,5...3,0	1,0	0,3...3,0
Аргондуговая неплавящимся электродом	1,0...7,0	10...30	2,5...5,0
Плавящимся электродом в защитном газе	1,5...9,0	30...60	3,0...5,0
Ручная дуговая, покрытыми электродами	0,8...3,0	20...50	2,0...5,0
Под флюсом одной проволокой	2,0...12	30...60	3,0...5,0
Под флюсом многоэлектродная	5,0...40	15...30	5,0...8,0
Под флюсом лентой	5,0...40	10...20	2,5...5,0
Дуговая самозащитной проволокой	2,0...9	25...50	2,5...5,0
Электрошлаковая двумя электродными лентами	10...60	5,0...15	1,5...5,0
Электрошлаковая электродными проволоками	20...60	10...20	6,0...50
Плазменная порошок	0,8...6,0	5...15	0,3...6,0
Индукционная	2,0...15	5...15	0,4...3,0

При выборе способа наплавки также следует учитывать его производительность (табл. 4.1) и то, что повышение износостойкости на-

плавленного слоя в большинстве случаев сопровождается снижением усталостной прочности изделий, например, для деталей из нормализованной стали уменьшение предела выносливости доходит до 25%, для деталей из закаленной стали – до 35%.

При восстановлении, в том числе автомобильных деталей, применяют ручные (газовую и электродугую) и механизированные виды наплавки: полуавтоматическую и автоматическую под слоем флюса, в среде защитных газов, вибродугую и др.

Автоматическая наплавка обладает целым рядом преимуществ по сравнению с ручной. При автоматической наплавке в состав наплавленного металла можно вводить до 35% легирующих элементов, что значительно повышает износостойкость и придает этому металлу необходимые свойства. При этом легирующие элементы расходуются более экономно, чем при ручной наплавке. При автоматической наплавке резко увеличивается производительность процесса, значительно улучшаются условия труда и качество наплавленного слоя, уменьшается расход электроэнергии и наплавочных материалов.

Ручная или автоматическая электродуговая наплавка деталей проводится отдельными валиками вдоль образующей или кольцевыми валиками с прерывистым смещением на шаг. При механизированной наплавке цилиндрических деталей валики наплавляют по винтовой линии так, чтобы каждый последующий валик перекрывал предыдущий на 1/2 или 1/3 своей ширины. Наплавка цилиндрических деталей затрудняется главным образом из-за опасности стекания с детали расплавленного металла, причем тем большей, чем меньше диаметр

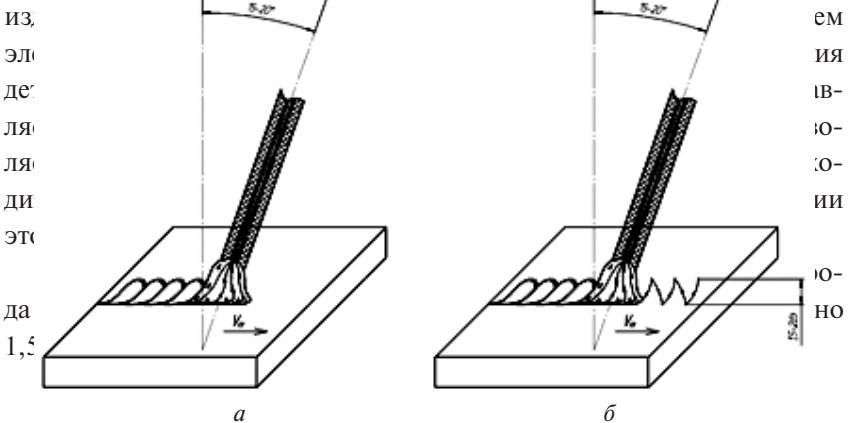


Рис. 4.38. Схема перемещения электрода при наплавке:  
*a* – без поперечных колебаний; *б* – с поперечными колебаниями

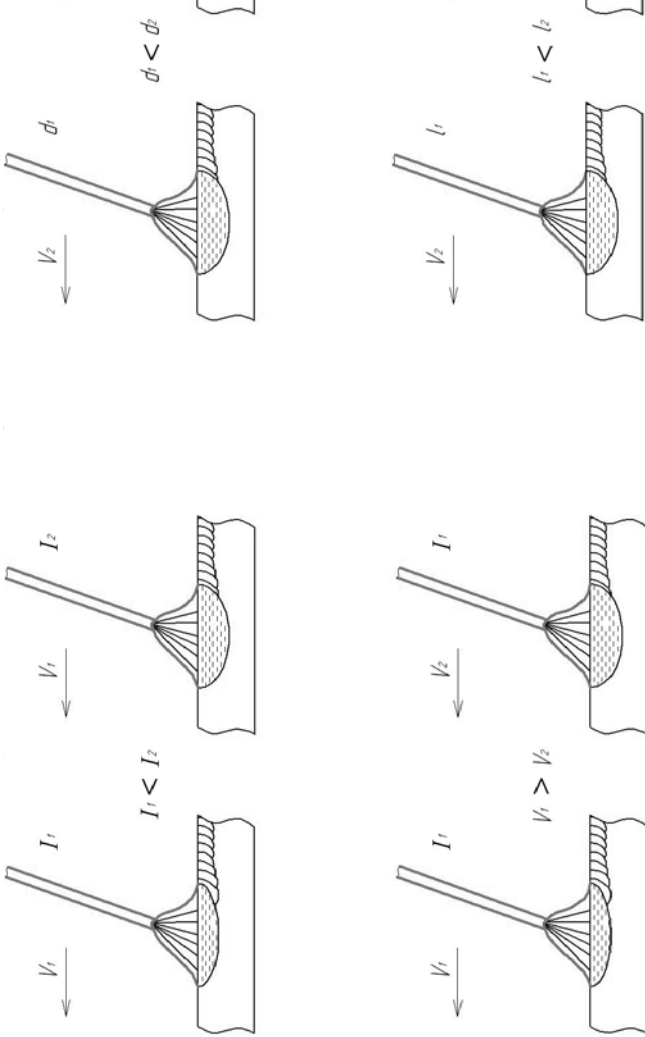
Для получения качественного слоя наплавленного металла большое внимание следует уделять скорости его охлаждения, так как при высокой скорости охлаждения в металле могут остаться не успевшие выделиться газы и шлаковые включения. Снижению скорости охлаждения способствуют поперечные колебания электрода (рис. 4.38, *б*). Этот технологический прием, который называется широкослойной наплавкой, с успехом используется при восстановлении кулачков распределительного вала.

Во избежание попадания жидкого шлака на еще не расплавленный основной металл электрод во время наплавки располагают под углом 15...20° к вертикали. При этом скорость вращения детали выбирается в зависимости от диаметра изделия и составляет 10...60 м/ч. Чем меньше диаметр детали, тем меньше должна быть окружная скорость. Механизированную электродуговую наплавку деталей диаметром менее 40 мм вообще не рекомендуется проводить из-за высокой вероятности стекания жидкого металла с поверхности изделий.

Высокую износостойкость наплавленного металла можно получить путем правильного выбора химического состава электродной проволоки, легирующих компонентов, находящихся в покрытии электрода или флюсе, защитных газов, режимов наплавки с учетом характерных особенностей каждого из способов наплавки в отдельности и в совокупности с последующей термической обработкой.

Введение марганца и хрома в качестве легирующих составляющих в малоуглеродистую сталь в количестве от 8 до 27% повышает в 4...5 раз ее износостойкость при механическом изнашивании. Причем введение хрома повышает износостойкость за счет увеличения твердости наплавленного слоя, а введение марганца – за счет увеличения ударной вязкости металла. Изделия с таким слоем хорошо работают при высоких удельных и ударных нагрузках. Необходимо отметить: для того чтобы при последующей закалке увеличить твердость до требуемого значения, наплавленный металл должен содержать не менее 0,35% углерода.

При восстановлении крупногабаритных деталей с большими диаметрами рекомендуется применять широкослойную наплавку ленточным электродом или пучком электродов. Пучок электродов – это



жду собой  
и электро-

периоди-  
чно го-  
тся обща  
тличие от  
а оперек  
и широко

несколь-  
ки один  
катодами.  
бразую об-  
наплавки  
электрод не-  
останов-  
вности  
для сельных  
навливае-  
та следую-  
тка между  
проволо-  
за различны-

При проведении ремонтной наплавки необходимо стремиться к минимальному проплавлению основного металла при достаточной устойчивости электрической дуги. Удовлетворительная устойчивость горения дуги обеспечивается при плотности тока, равной  $11 \dots 12 \text{ А/мм}^2$ . При этом глубина проплавления уменьшается при поперечных колебаниях электрода, снижении силы тока  $I$ , увеличении скорости наплавки  $V$ , диаметра электрода  $d$  и установочной длины  $l$  электрической дуги (рис. 4.39). Кроме того, при наплавке углом вперед глубина проплавления меньше, чем при наплавке углом назад.

Ручная электродуговая наплавка покрытыми электродами приме-

няется при восстановлении деталей достаточно редко. С её помощью можно исправлять такие дефекты, как износ шпоночных канавок, износ паза под рычаг выключения сцепления, пазов вилок переключения передач и др. Типичным примером ручной электродуговой наплавки плоской поверхности является восстановление изношенных пазов вилки под фланец каретки синхронизатора, изготовленной из низкоуглеродистой стали и упрочненной химико-термической обработкой до твердости  $HRC_9$  56...62. Процесс восстановления состоит из предварительного подогрева изделия в печи или газовой горелкой до температуры 150...200° С, наплавки, которую проводят электродом диаметром 3 мм при силе тока 200 А и напряжении дуги 30...35 В, отжига, фрезерования пазов и закалки токами высокой частоты.

Примечательно, что режимы ручной электродуговой наплавки примерно такие же, как при сварке.

В ремонтной практике автоматическая наплавка под слоем флюса применяется в тех случаях, когда нужно наплавить слой толщиной более 3 мм. Наплавкой под слоем флюса восстанавливают коленчатые валы, цапфы картера заднего моста, полуоси заднего моста и многие другие детали автомобиля.

Наплавочное оборудование устанавливается на суппорте, а наплавляемая деталь – в центрах задней и передней бабок токарного станка. При наплавке электродная проволока специальным подающим механизмом подается через мундштук (скользящий электрический контакт) и бункер с флюсом к наплавляемой поверхности детали. Подающий механизм включает, как правило, четыре ролика, которые служат как для подачи, так и для выпрямления электродной проволоки. В качестве источника питания используют преобразователи и выпрямители с жесткой внешней (вольт-амперной) характеристикой. Возникающая в контакте проволоки с деталью электрическая дуга горит под слоем флюса, состоящего из отдельных мелких крупиц (зерен) (рис. 4.40). Под действием высокой температуры часть флюса плавится, образуя вокруг дуги эластичную оболочку, которая надежно защищает расплавленный металл от действия кислорода и азота воздуха. На границе расплавленного металла сварочной ванны с жидким шлаком происходит диффузия компонентов флюса и металла расплавленного шлака в сварочную ванну и обратно. Флюс наряду с защитной функцией выполняет задачи

раскисления, легирования и рафинирования металла валика. Благодаря наличию во флюсе элементов с низким потенциалом ионизации он способствует устойчивому горению электрической дуги.

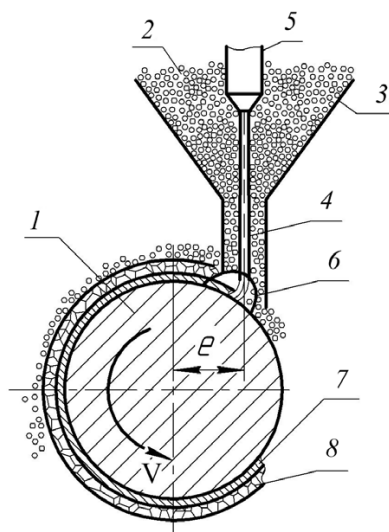


Рис. 4.40. Схема наплавки под слоем флюса: 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – флюс; 3 – бункер; 4 – электродная проволока; 5 – мундштук; 6 – эластичная оболочка, образованная из расплавленного флюса; 7 – наплавленный слой металла; 8 – шлаковая корка

Суппорт с наплавочной головкой перемещается вдоль детали с необходимой подачей, образующей спираль перекрывающих друг друга наплавленных валиков. По мере перемещения дуги жидкий металл твердеет вместе с флюсом, образуя на наплавленной поверхности ломкую шлаковую корку. Флюс, который не расплавился, ссыпается с детали и может быть использован повторно. По истечении 2...3 минут после окончания процесса наплавки с помощью молотка, соблюдая меры предосторожности, сбивают шлаковую корку и очищают наплавленный слой от остатков флюса.

Для наплавки низкоуглеродистых и низколегированных сталей используется флюс типа АН-348А с добавлением феррохрома, ферромарганца и сварочная проволока из низкоуглеродистых Св-08, Св-08А и низколегированных Св-08Г, Св-08ГА сталей, которые дают

твердость наплавленного металла порядка 25 HRC. Стали с большим содержанием углерода наплавляют проволокой Нп-65Г, Нп-80, в которой содержится 0,6...0,8% углерода, с использованием плавящихся и керамических флюсов. Твердость наплавленного слоя в этом случае зависит от его толщины, режима наплавки и составляет 45...52 HRC.

Наплавка под слоем флюса может использоваться не только для восстановления цилиндрических тел вращения, но и для ремонта плоских деталей.

*Преимущества наплавки под слоем флюса:*

- большая глубина проплавления металла восстанавливаемой детали;
- устойчивое горение электрической дуги;
- высокая производительность процесса;
- возможность введения в наплавляемый слой легирующих добавок не только металла электродной проволоки, но и из флюса;
- наплавка не сопровождается световыми излучениями, присущими электродуговой сварке (из-под слоя флюса лишь изредка выскакивают искорки), и разбрызгиванием расплавленного металла, что позволяет вести процесс без особой защиты от излучений.

*Недостатки наплавки под слоем флюса:*

- высокий нагрев наплавляемой детали, который изменяет результаты исходной термообработки и может привести к короблению изделия;
- нестабильные размеры (высота и ширина) наплавленных валиков;
- невозможность наплавки деталей, диаметр которых менее 40 мм, из-за стекания наплавленного металла и интенсивного ссыпания флюса с поверхности детали.

Для восстановления изношенных деталей в ремонтном производстве достаточно распространен способ вибродуговой наплавки. Он позволяет наращивать слой металла толщиной от 0,3 до 3,0 мм.

Установка для вибродуговой наплавки представляет собой источник постоянного тока с жесткой внешней характеристикой (сварочный трансформатор с индуктивным дросселем или специальный генератор), мундштук для подачи сварочной проволоки, который может совершать колебательные движения (в качестве привода обычно используют электромагнит, запитываемый переменным током частотой 50 Гц), и систему подачи охлаждающей жидкости в зону наплавки

(рис. 4.41). Подача охлаждающей жидкости (4...6%-го водного раствора кальцинированной соды) в зону наплавки защищает металл от окисления и способствует закаливанию металла наплавленного слоя.

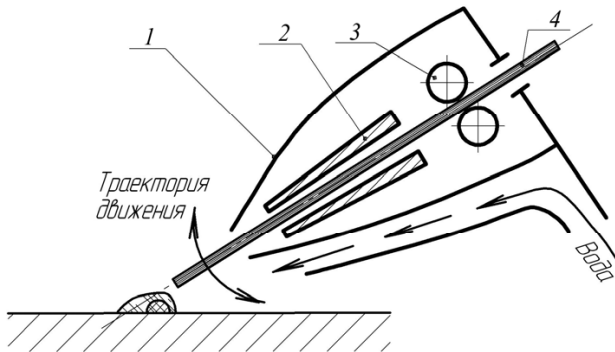


Рис. 4.41. Схема вибродуговой наплавки: 1 — наплавочная головка; 2 — мундштук; 3 — механизм подачи электродной проволоки; 4 — электродная проволока

К наплавляемой поверхности детали, которая вращается в центрах токарного станка, роликами подающего механизма из кассеты через вибрирующий мундштук подается электродная проволока. При этом с помощью вибратора происходит ее периодическое замыкание и размыкание с наплавляемой деталью. Вибрация мундштука вместе с проволокой происходит с частотой 110 Гц и амплитудой колебаний 1,8...3,2 мм. Благодаря вибрациям процесс наплавки может быть осуществлен при достаточно низком напряжении 12...18 В.

Каждый цикл колебательного перемещения электродной проволоки включает четыре последовательно протекающих процесса: короткое замыкание, отрыв электродной проволоки от детали, электрический разряд, холостой ход. При коротком замыкании ток быстро возрастает до максимального значения, а напряжение трансформатора падает — происходит приварка конца проволоки к поверхности детали. При отрыве разогретой проволоки происходит ее утонение и обрыв на некотором удалении от поверхности детали. При этом на ней остается частица приваренного металла. В момент отрыва электродной проволоки напряжение трансформатора за счет самоиндук-



ции увеличивается и в результате этого возникает кратковременный электродуговой разряд с выделением большого количества тепла, оплавливающего приваренную частицу металла на поверхности изделия. По мере отхода электродной проволоки от детали электрическая дуга исчезает и наступает период холостого хода. Далее электродная проволока опять приближается к поверхности детали и замыкается с ней. При относительном перемещении наплавочной головки и детали каждая частица электродной проволоки приваривается на новое место, в том числе и на ранее приваренные частицы. Благодаря вибрации электродной проволоки можно получить тонкие и прочные покрытия без существенного нагрева основного металла.

Следует отметить, что одним из основных показателей качества наплавленной детали является сопротивление усталости, которое при вибродуговой наплавке в основном зависит от трёх технологических факторов: количества охлаждающей жидкости, подаваемой в зону наплавки, шага и скорости наплавки. Кристаллизация наплавленного металла при вибродуговой наплавке происходит почти мгновенно, поэтому восстановленная поверхность, как правило, имеет множество микротрещин, которые приводят к заметному снижению предела выносливости изделия.

Высокое качество наплавки получают при токе обратной полярности, шаге наплавки 2,3...2,8 мм/об и угле подвода проволоки к детали 15...30°. Скорость подачи электрода не должна превышать 1,65 м/мин, а скорость наплавки – 0,5...0,65 м/мин. При этом толщина наплавленного слоя, при которой обеспечивается надежное сплавление, должна составлять не менее 2,5 мм.

Структура и твердость наплавленного слоя во многом зависят от химического состава электродной проволоки и количества охлаждающей жидкости. Наплавка изношенной детали низкоуглеродистой проволокой Св-08 дает пониженную твердость (14...19  $HRC_3$ ) поверхности. При наплавке проволокой Нп-80 (с содержанием углерода 0,75...0,85%) металл в охлаждающей жидкости закаливается до высокой твердости и частично подвергается отпуску. При этом образуется неоднородная структура от мартенсита закалки до троостосорбита отпуска с твердостью в пределах 26...55  $HRC_3$ .

Для комбинированной наплавки под слоем флюса вибрирующим

электродом можно применять электродную проволоку марки Нп-80 и флюс АН-348А, которые позволяют получить твердость наплавленного слоя в пределах 36...38  $HRC_{\text{э}}$ . Для увеличения твердости наплавленного металла до уровня 52...54  $HRC_{\text{э}}$  к флюсу АН-348А добавляют по 2% феррохрома и серебристого графита.

*Преимущества вибродуговой наплавки:*

- процесс происходит без существенного нагрева и коробления детали;
- наплавка не приводит к заметному изменению результатов исходной термообработки детали;
- наплавленный слой имеет пористую структуру, которая хорошо удерживает смазку в процессе эксплуатации восстановленной детали.

*Недостатки вибродуговой наплавки:*

- снижение до 40% усталостной прочности восстановленной детали из-за высокой пористости наплавленного слоя. Этот показатель может быть улучшен соответствующей термообработкой. При нагреве наплавленной детали до температуры 150...200°C происходит увеличение сопротивления усталости на 15...20%; при проведении нормализации (с температурой 800...900°C) усталостная прочность повышается на 35...45%, а при проведении нормализации с последующей закалкой ТВЧ сопротивление усталости может повыситься до 80% (по сравнению с сопротивлением усталости новой детали);
- при действии значительных нагрузок на восстановленную поверхность может происходить отшелушивание;
- низкая производительность.

Вибродуговая наплавка весьма эффективна при восстановлении изношенных шеек валов, работающих в условиях трения скольжения в сальниковых уплотнениях и подшипниках скольжения. В отличие от наплавки под слоем флюса, когда минимальный диаметр наплаваемого изделия ограничивается 40 мм из-за опасности стекания с поверхности детали расплавленного металла, при вибродуговой наплавке можно восстанавливать детали практически любого диаметра, так как при наплавке этим способом расплавленный металл практически мгновенно кристаллизуется. Однако при вибродуговой наплавке фланцев ведомых валов коробок передач и валов ведущих конических шестерен задних мостов автомобилей ЗИЛ, ГАЗ возникает нежелательный эффект, который проявляется в существенном уменьше-

нии диаметра осевых отверстий этих изделий. Уменьшение диаметра обусловлено усадкой наплавленного металла, происходящей при его кристаллизации. Регулированием скорости и шага наплавки можно добиться снижения проявления этого эффекта и, соответственно, уменьшения диаметра отверстия всего лишь до 0,2 мм.

Наплавка в среде защитного газа в значительной степени отличается от других способов восстановления деталей – не нужно ни флюсов, ни электродных покрытий. Дуга между плавящимся электродом и наплавляемым изделием горит в струе защитного газа. Он подается из баллона по рукаву через сопло горелки в пространство между концом электродной проволоки и наплавляемым изделием. Защитный газ окружает электрическую дугу со всех сторон и вытесняет воздух из плавильного пространства, предохраняя расплавленный металл от воздействия кислорода и азота воздуха (рис. 4.42).

При наплавке этим способом углеродистых и низколегированных сталей в качестве защитного газа используют углекислый газ, а высоколегированных сталей – аргон.

При наплавке в среде углекислого газа применяют электродные проволоки малого диаметра (0,8...2,0 мм) и токи относительно большой плотности. Расход углекислого газа в зависимости от диаметра электродной проволоки может составлять 8...15 дм<sup>3</sup>/мин. На расход газа также оказывают влияние скорость наплавки, конфигурация изделия и наличие движения воздуха.

Параметры режима наплавки в среде углекислого газа (диаметр электродной проволоки, сила тока, напряжение дуги и скорость наплавки) определяются в том числе по диаметру наплавляемой детали. Наплавку в среде углекислого газа ведут на постоянном токе обратной полярности. Источники питания электрической дуги должны иметь жесткую внешнюю характеристику и скорость нарастания силы тока короткого замыкания в интервале 70...110 кА/с.

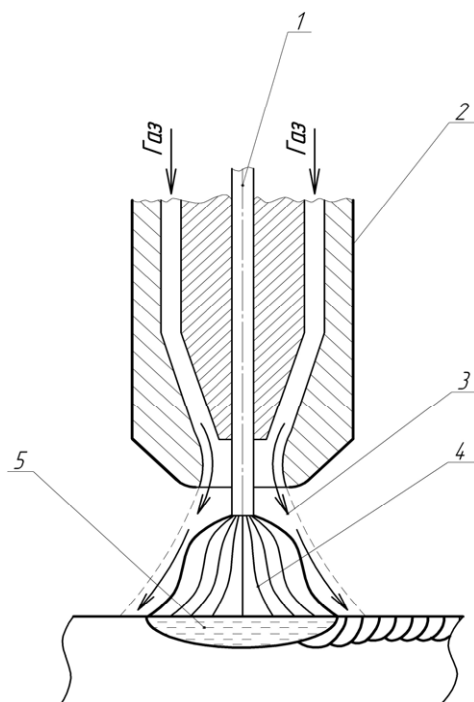


Рис. 4.42. Схема наплавки в среде защитного газа: 1 – электродная проволока; 2 – сварочная горелка; 3 – атмосфера защитного газа; 4 – электрическая дуга; 5 – сварочная ванна

Скорость подачи проволоки зависит от силы тока, устанавливаемой с таким расчетом, чтобы в процессе наплавки не было коротких замыканий и обрывов дуги. Скорость наплавки устанавливают в зависимости от толщины наплавляемого металла и качества наплавленного слоя. При этом наплавку валиков обычно осуществляют с шагом 2,5...3,3 мм.

Твердость наплавленного металла обусловлена маркой и типом электродной проволоки, которую выбирают в зависимости от материала восстанавливаемой детали и требуемых физико-механических свойств наплавленного металла. При наплавке в среде углекислого газа в основном используют электродную проволоку Св-12ГС, Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12Х13, Св-06Х19Н9Т, Св-18ХМА, Нп-30ХГСА и порошковую проволоку ПП-Р18Т, ПП-Р19Т, ПП-4Х28Г и др., которые позволяют получить наплавленный слой твердостью 200...300 НВ.

*Преимущества наплавки в среде защитного газа:*

- процесс происходит без вредных выделений и образования шлаковой корки;
- открытая дуга дает возможность наблюдать и корректировать процесс наплавки;
- наплавка может проводиться при любом пространственном положении поверхности наплавляемой детали;
- производительность процесса на 20...70% выше по сравнению с электродуговой наплавкой;
- возможность проводить наплавку на мелких деталях, например валах диаметром 10 мм.

*Недостатки наплавки в среде защитного газа:*

- повышенное разбрызгивание наплавляемого металла;
- ограниченное легирование наплавленного слоя;
- необходимость

Большими возможностями при изготовлении деталей и производства облат (рис. 4.43). С помощью при этом проволоки. С це можно наплавля дующем хороше

Особенность плавки двумя кон ный газ, а во внут кая дуга горит ме пламени. Сгораз взаимодействия наплавленном сл ристость наплав

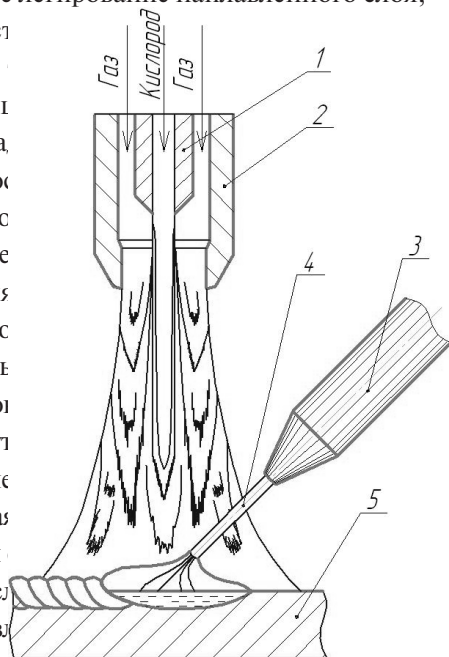


Рис. 4.43. Схема наплавки с газопламенной защитой:

- 1 — сопло для подачи кислорода; 2 — сопло для подачи природного газа;
- 3 — мундштук; 4 — присадочная проволока; 5 — деталь

При выполнении наплавочных работ в качестве газа обычно ис-

пользуют ацетилен или пропано-бутановую смесь.

Для наплавки с газопламенной защитой применяется двухсopловая горелка. Ее крепят к мундштуку таким образом, чтобы её ось совпадала с концом электрода. От перегрева в процессе наплавки газовая горелка и головка мундштука защищены системой водяного охлаждения.

Установка для наплавки с газопламенной защитой монтируется на суппорте токарного станка. Для создания газопламенной защиты установку оснащают горелкой, системой питания горелки газами, а также системой охлаждения горелки и наплавляемой детали. Для питания электрической дуги применяют источники с пологопадающей или жесткой внешней характеристикой. «Плюс» источника питания подключают к электроду. Охлаждение детали раствором кальцинированной соды и использование тока большей силы, чем при наплавке в углекислом газе, позволяют сформировать наплавленный слой удовлетворительного качества и высокой твердости 56...64 HRC<sub>2</sub>.

*Преимущества дуговой наплавки с газопламенной защитой:*

- возможность наплавлять детали небольшого диаметра, не опасаясь их перегрева;
- высокая производительность процесса;
- возможность применения для наплавки электродных проволок большого диаметра.

*Недостаток дуговой наплавки с газопламенной защитой:*

- повышенная пористость наплавленного слоя.

Все большее распространение в ремонтном деле получает плазменная наплавка.

По виду присадочного материала способы плазменной наплавки можно разделить на три основные группы:

- 1) наплавка проволокой или прутками;
- 2) наплавка по неподвижной присадке, уложенной на наплавляемой поверхности;
- 3) наплавка порошком.

Плазменная наплавка порошком (плазменно-порошковая наплавка) используется при нанесении тонкослойных покрытий на тяжело нагруженные детали с относительно малым износом. С её помощью восстанавливают такие ответственные детали, как коленчатые, распределительные валы, клапаны двигателей внутреннего сгорания,

крестовины карданных шарниров и др. Этим деталям для нормальной работы требуется по поперечному сечению иметь твердый поверхностный слой и пластичную сердцевину.

Особенностью плазменной наплавки является использование комбинированной плазменной дуги – косвенного и прямого действия. Дуга косвенного действия, горящая между вольфрамовым электродом и соплом горелки, служит в основном для устойчивой работы плазмотрона. Более мощная дуга прямого действия, горящая между электродом и изделием, обеспечивает необходимый нагрев поверхности изделия, плавление присадочного металла и образование сварочной ванны. Мелкогранулированный металлический порошок, подаваемый инертным транспортирующим газом из специального порошкового питателя в зону дуги, расплавляется в потоке плазменной струи и выносится ее течением на обрабатываемое изделие (рис. 4.44). При этом струя плазмы, подогревая деталь, обеспечивает хорошее сплавление присадочного материала с основным металлом. Защита наплавляемого слоя от воздействия кислорода и азота воздуха обеспечивается потоком защитного инертного газа, который окружает плазменную струю. При плазменной наплавке в качестве плазмообразующего, защитного и транспортирующего газа обычно используют аргон.

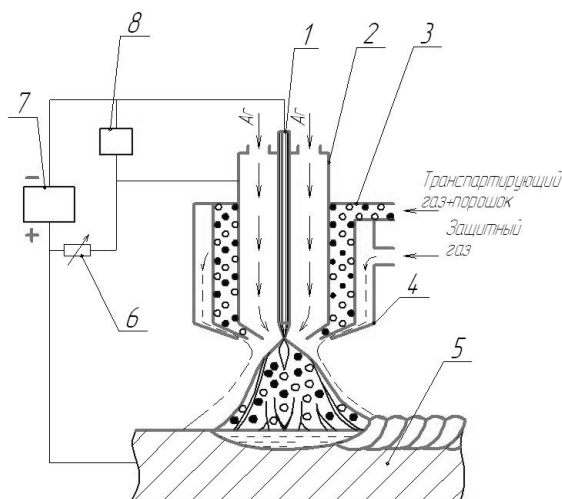


Рис. 4.44. Схема плазменно-порошковой наплавки: 1 – электрод;

2 – плазменное сопло; 3 – фокусирующее сопло; 4 – защитное сопло;  
5 – изделие; 6 – балластный реостат; 7 – источник питания; 8 – осциллятор

Наплавка металлическим порошком позволяет получить износоустойчивые покрытия с высокими физико-химическими свойствами, которые значительно увеличивают долговечность изделий. Благодаря высокой температуре плазменного потока (до 35000°С) наплавку можно осуществлять порошками, получаемыми практически из любых наплавочных сплавов независимо от степени их легирования, твердости, пластичности и других свойств. Наибольшее применение получили порошки из кобальтовых и никелевых сплавов. В меньшей степени используются порошки на основе железа и меди.

Существуют две основные схемы ввода порошка в зону дуги, отличающиеся тем, что в одном случае порошок вводится в зону дуги внутри плазмотрона, а в другом – вне его. При внутреннем вводе порошка в зону дуги создаются более благоприятные условия для его нагрева плазмой. При внешней подаче порошка его нагрев менее эффективен, зато значительно повышается надежность работы плазмотрона при наплавке. Минимальная толщина наплавленного слоя при внутренней подаче порошка составляет 0,25 мм, при внешней – 0,5 мм.

Благодаря незначительному проплавлению основного металла, оптимальной толщине и хорошему формированию наплавленного слоя плазменная наплавка по сравнению с другими методами обеспечивает более экономное расходование наплавочных материалов и сокращает расходы на последующую механическую обработку. Так, технологический припуск на абразивную обработку наплавленных деталей составляет всего 0,4...0,9 мм. Незначительное тепловложение в наплавляемую деталь позволяет предотвратить образование остаточных деформаций и изменения структуры основного металла. Однако при этом плазменная наплавка приводит к снижению усталостной прочности деталей в среднем на 10...15%.

Возможность регулирования в широком диапазоне соотношения между энергетическими характеристиками дуги и подачей присадочного порошка позволяет создать благоприятные условия наплавки качественного слоя за один проход (необходимая твердость наплавленного металла обеспечивается уже на расстоянии 0,3...0,5 мм от поверхности сплавления) и получить достаточно высокую производи-



тельность процесса.

*Преимущества плазменной наплавки:*

- высокая температура плазменного потока позволяет расплавлять и наносить самые тугоплавкие материалы;
- высокая производительность процесса при минимальных потерях присадочного материала;
- высокотемпературный поток плазмы дает возможность получать сплавы из различных по свойствам материалов или наносить многослойные покрытия из различных сплавов. Это открывает широкую возможность получения покрытий, сочетающих разнообразные эксплуатационные и защитные свойства;
- возможность наплавления покрытий на детали любой формы и размеров;
- малая глубина проплавления снижает и вероятность образования остаточных деформаций изделий.

К недостаткам плазменной наплавки следует отнести высокую стоимость технологического оборудования и наплавочных материалов.

Для восстановления износостойкого слоя значительной толщины (более 10 мм) применяют электрошлаковую наплавку. Сущность электрошлаковой наплавки заключается в том, что плавление металла электрода происходит в расплавленном шлаке за счет теплоты электросопротивления, выделяемой при прохождении тока через шлаковую ванну (рис. 4.45).

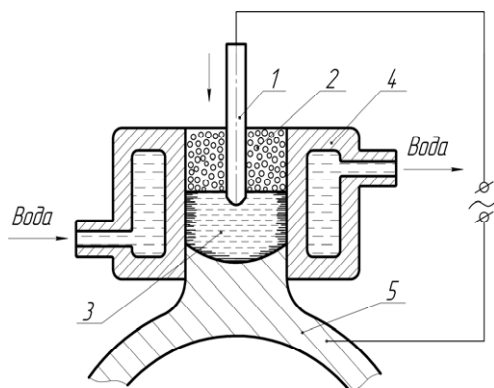


Рис. 4.45. Схема электрошлаковой наплавки: 1 – электрод; 2 – шлак;

- 3 – шлаковая ванна; 4 – водоохлаждаемый кристаллизатор;  
5 – восстанавливаемое изделие

В начале процесса в зазор между деталью и водоохлаждаемым кристаллизатором засыпают флюс, зажигают дугу между электродной проволокой и деталью. После образования шлаковой ванны достаточной глубины дугу гасят и начинают бездуговой процесс наплавки, при котором ток проходит через жидкий шлак и расплавляет присадочный материал, непрерывно подаваемый в сварочную ванну. Расплавленный присадочный материал формируют в нужную форму покрытия с помощью охлаждаемого кристаллизатора. В качестве присадочного материала применяют сварочную или высоколегированную проволоку, электродные ленты, пластины и стержни большого сечения. При ремонте деталей автомобиля широко используется измельченный плавленный флюс АН-348А. Примечательно, что расход флюса при электрошлаковой наплавке в 15...20 раз меньше, чем при электродуговом способе.

*Преимущества электрошлаковой наплавки:*

- высокая производительность;
- возможность наплавки на поверхности тел вращения;
- отсутствие газообразования и разбрызгивания металла. Это позволяет получить высокое качество наплавленного металла без пор и трещин;
- возможность получения гладких и ровных поверхностей наплавленного слоя, что позволяет использовать восстановленные детали без последующей механической обработки.

*Недостаток электрошлаковой наплавки:*

- большая погонная энергия процесса.

Наплавка порошковой проволокой по своей сути не является отдельным видом наплавки. Она представляет собой разновидность механизированной наплавки под слоем флюса или в среде защитного газа, которая позволяет расширить их технологические возможности. Гораздо реже наплавку порошковой проволокой проводят без флюсовой или газовой защиты. В этой связи используют два типа порошковой проволоки: для наплавки под слоем флюса и для наплавки открытой дугой без дополнительной защиты. Порошковая проволока представляет собой стальную трубку, заполненную порошкообразной шихтой, которую на-

зывают сердечником. В состав шихты входят наплавляемый присадочный материал, раскислители и шлакообразующие компоненты. До 60% объема сердечника составляет железный порошок. Сердечник порошковой проволоки активно влияет на стабильность горения дуги и снижает тем самым разбрызгивание металла при работе на постоянном токе и низком напряжении (20...21 В). Использование в качестве присадочного материала железного порошка позволяет увеличить производительность наплавки в 2...4 раза по сравнению с электродуговой наплавкой покрытыми электродами. Высокое качество наплавленного слоя дает наплавка порошковой проволокой диаметром 1,6...1,8 мм, в состав которой входят феррохром, ферротитан, ферромарганец и графит. При наплавке такой проволокой можно получить металл с трооститно-мартенситной структурой, твердость которого составляет 51...57 HRC<sub>3</sub>, а износостойкость в 1,6...2 раза больше, чем у закаленной стали. Следует подчеркнуть, что применение для наплавки порошковой проволоки снижает на 20...30% себестоимость наплавленного металла по сравнению с электродуговой наплавкой покрытыми электродами.

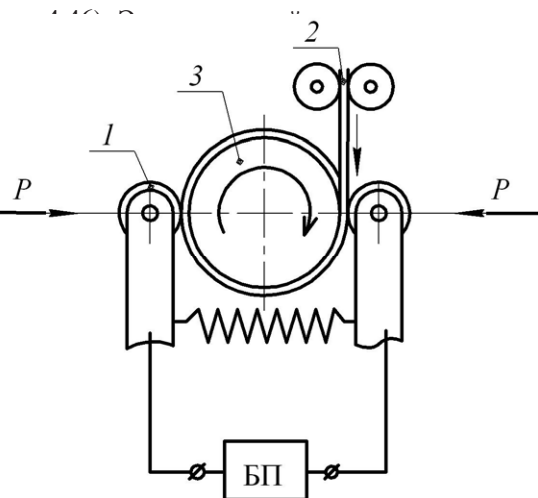
*Преимущества наплавки порошковой проволокой по сравнению с наплавкой проволокой сплошного сечения:*

- возможность использования источников постоянного и переменного тока;
- возможность регулирования в широких пределах химического состава наплавленного металла за счёт подбора шихты;
- возможность формирования валика под слоем шлака, образованного шихтой;
- хорошее состояние наплавленной поверхности;
- небольшая глубина проплавления основного металла;
- возможность применения детали без последующей механической обработки.

*Недостатками наплавки порошковой проволокой по сравнению с наплавкой проволокой сплошного сечения являются малая скорость плавления и низкая производительность процесса наплавки.*

В ремонтном производстве находит широкое применение электродуговая наплавка — это способ, при котором на поверхность детали навивается проволока (или лента) из материала с необходимыми свойствами и периодическими импульсами тока приваривается

к изделию (д  
точки, образ  
ем приложе  
получения з  
сварки пода  
неизменнос  
применения  
Установи  
блок питани  
тку из двух  
их упругого  
лаутоматич  
метром 20...



контактные  
воздействи-  
ала детали и  
о слоя в зону  
обеспечить  
бойтись без  
ки содержит  
арки, осна-  
ройство для  
ботает в по-  
детали диа-

Рис. 4.46. Схема электроконтактной наплавки:  
1 – медные ролики; 2 – проволока; 3 – изделие

Производительность процесса электроконтактной наплавки зависит от частоты вращения детали, продольной подачи сварочных роликов и частоты следования импульсов. За один проход может быть приварен слой толщиной 0,15...1,5 мм. Частота вращения детали должна составлять до 20 об/мин, подача сварочных роликов при ширине их рабочей части 4 мм должна быть равной 3 мм/об., при этом максимальная потребляемая мощность составляет 75 кВт. В процессе приварки проволоки на детали диаметром до 50 мм сварочные ролики должны поджиматься с усилием 1,3...1,4 кН. Приварка производится при напряжении 325...380 В. Очевидно, что с увеличением диаметра проволоки или толщины ленты необходимо увеличивать напряжение. Для повышения прочности сцепления наплавленного слоя с основным материалом рекомендуется получать на 1 см длины шва шесть или семь сварных точек.

Способ восстановления деталей электроконтактной приваркой проволоки широко применяют для восстановления посадочных мест под подшипники, резьбовых частей валов и др. Перспективным направлением при восстановлении и упрочнении деталей является приварка к изношенным поверхностям порошковых твердых сплавов.

#### *Преимущества электроконтактной приварки проволоки:*

- высокая производительность процесса при низкой энергоемкости;
- незначительная потеря присадочного материала;
- благоприятные санитарно-производственные условия работы, поскольку процесс приварки происходит без вредных световых излучений;
- процесс происходит без существенного нагрева и деформации детали;
- возможность наплавки, точнее приварки, без защитной среды вследствие кратковременного термического воздействия на присадочный металл;
- возможность приварки металлического слоя различной твердости и износостойкости;
- возможность регулирования толщины наносимого слоя.

#### *Недостатки электроконтактной приварки проволоки:*

- некоторое снижение усталостной прочности детали;
- неоднородность свойств на поверхности восстановленной детали.

Ограниченное применение способа электроконтактной приварки проволоки при восстановлении деталей автомобилей может быть объяснено недостаточно отработанной конструкцией технологического оборудования.

#### *Контрольные вопросы*

1. От каких факторов зависит глубина проплавления основного металла?
2. Какую функцию в процессе наплавки выполняет флюс?
3. Какие преимущества и недостатки имеет наплавка под слоем флюса?
4. Какие преимущества и недостатки имеет вибродуговая наплавка?
5. Относительно длинный вал имеет износ поверхности, работавшей в паре с подшипником скольжения. Каким методом наплавки вы воспользуетесь для восстановления изношенной поверхности?
6. В чем заключается сущность способа восстановления деталей электроконтактной приваркой проволоки?

#### **4.2.3. Новые виды сварки и наплавки**

К новым видам сварки и наплавки, не нашедшим еще широкого применения в авторемонтном производстве, но успешно апробиро-

ванным в лабораторных условиях, можно отнести электронно-лучевую, лазерную сварку, наплавку токами высокой частоты, наплавку пропиткой композиционных сплавов, наплавку взрывом, наплавку самораспространяющимся высокотемпературным синтезом и др. Они разработаны в различных научно-исследовательских институтах, в том числе НПО НИИавтопрома.

Электронно-лучевую сварку можно применять при ремонте, например, блоков шестерен. Спаренный блок шестерен, состоящий из двух шестерен разного диаметра, при поломке или износе зубьев одной из них ранее не подлежал ремонту и отправлялся в утиль. Учитывая конструктивную сложность и высокую стоимость изделия, блок шестерен можно восстановить следующим образом. Сначала отрезают поврежденную шестерню, изготавливают точно такую же новую и приваривают ее электронно-лучевой сваркой к неповрежденной старой без разделки соединяемых кромок. Работоспособность блока шестерен после такого ремонта не уступает работоспособности нового блока.

При этом способе глубина проплавления без значительного нагрева металла околошовной зоны может достигать достаточно большой величины (до 40 мм).

Электронным лучом также можно проводить отбеливание кулачков чугунных распределительных валов, повышая таким образом в несколько раз их износостойкость.

Лазерная сварка имеет ряд особенностей, выгодно отличающих её от других способов: локальность процесса сварки, возможность сваривания труднодоступных мест, незначительное тепловложение в изделие. Сварка лазерным лучом может производиться как на воздухе при обычных условиях, так и в среде защитного газа, например аргона. Благодаря возможности преломления при помощи зеркал лазерный луч можно направлять в труднодоступные места, такие как внутренняя рабочая поверхность чугунных гильз блока цилиндров, что дает возможность повысить ее износостойкость на 30...50%.

Восстановлению лазерной сваркой подвергают многие детали, испытывающие значительные контактные нагрузки. После такого восстановления существенно повышается износостойкость фасок тарелок клапанов, рабочих поверхностей золотников топливной аппаратуры, седел выпускных клапанов и др.

Наплавку износостойкого порошка токами высокой частоты можно использовать для восстановления, например, внутренней поверхности гильзы цилиндра. Это позволяет повысить ее износостойкость в 1,8...2,5 раза по сравнению с износостойкостью поверхности нового изделия. Сущность способа заключается в следующем. Предварительно в гильзу цилиндра засыпается шихта, состоящая из наплавляемого порошка и флюса. После этого гильзе задается вращение. В результате шихта равномерно распределяется по внутренней поверхности гильзы. Затем в гильзу цилиндров вводится индуктор, который нагревает её до температуры плавления шихты. В качестве наплавочного материала используют такой сплав, который обладает минимальной магнитной проницаемостью и имеет температуру плавления на 150...200°С ниже температуры плавления основного металла. К таким материалам относится прежде всего высокоуглеродистый и высокохромистый сплав – сормайт. Он обеспечивает высокую твердость, износостойкость и адгезионную прочность. В качестве флюса применяют смесь на базе борного ангидрида и обезвоженной буры. В результате получают наплавленный слой, состоящий из твердого раствора на основе хрома, сложной эвтектики, а также избыточных карбидов и боридов, поверхностная твердость которого равна  $HRC_{\text{с}}$  55...58. Для снижения остаточных напряжений после наплавки, как правило, производят высокотемпературный отпуск. Лучшие результаты дает отпуск при нагреве детали до температуры 550°С, выдержке в течение 4 часов и медленном охлаждении. Такой отпуск снижает остаточные напряжения гильзы в среднем в 4,7 раза.

Наплавку пропиткой композиционных сплавов в основном применяют для восстановления плоских деталей. На деталь устанавливают форму, которая образует над восстанавливаемой поверхностью полость. Ее высота должна соответствовать толщине наплавляемого слоя. В эту полость засыпают смесь мелких крупиц литого карбида и отходов металлокерамического твердого сплава. Над смесью укладывают куски наполнителя, т. е. сплава, например, марганцевого мельхиора, который обладает низкой температурой плавления и хорошей смачивающей способностью. При нагреве восстанавливаемой детали до температуры, превышающей температуру плавления сплава-наполнителя, получают композиционное покрытие, которое после отверждения подвергают механической обработке.

При наплавке взрывом (плакировании) восстанавливаемую деталь устанавливают на жесткое массивное основание. Над ней располагают пластину присадочного материала, поверх которой укладывают заряд гранулированного взрывчатого вещества. При взрыве образуется плоская детонационная волна, которая нагревает и сжимает присадочный материал. При этом на поверхности контакта возникает давление, измеряемое в тысячах МПа, которое вызывает пластическое течение присадочного металла. В результате образуется прочная металлическая связь присадочного материала с основой. При этом практически отсутствует перемешивание присадочного материала с основой, что позволяет сформировать уникальные в своем роде эксплуатационные свойства покрытия. Покрытия из плакированного материала обладают высокой фреттингстойкостью и износостойкостью при абразивном изнашивании.

Наплавка самораспространяющимся высокотемпературным синтезом основана на использовании большого количества теплоты, выделяющейся при реакции некоторых химических элементов с бором, углеродом, азотом, кремнием и другими металлоидами. Для обеспечения процесса высокотемпературного синтеза присадочные материалы должны быть подобраны так, чтобы образующиеся в результате химической реакции вещества (инициаторы) обладали большой энергией активации. Благодаря этой энергии реакция взаимодействия из локальной зоны постепенно распространяется далее, вызывая цепь превращений вещества на всей поверхности детали. Полученный в результате химической реакции продукт представляет собой тугоплавкое соединение (композиционное покрытие), которое обладает большой прочностью сцепления с основным металлом и высокой износостойкостью.

#### *Контрольные вопросы*

1. Какие новые виды сварки и наплавки вы знаете?
2. Каковы отличительные особенности лазерной сварки?
3. В чем заключается сущность способа наплавки пропиткой композиционных материалов?
4. Какими достоинствами обладает наплавка взрывом?
5. Какие требования предъявляются к наплавочному материалу при наплавке токами высокой частоты?



6. Какой вид тепловой энергии используется при наплавке самораспространяющимся высокотемпературным синтезом?

### **4.3. Восстановление деталей напылением**

Металлизация распылением является одним из универсальных процессов нанесения покрытий на детали различных конфигураций и размеров практически из любых материалов. Толщина покрытий может составлять от 0,03 до 10 мм. Напыление помимо восстановления первоначальных размеров применяют для улучшения эксплуатационных свойств, в том числе износостойкости деталей. Повышение износостойкости осуществляют путем напыления слоя с высокими антифрикционными свойствами, который состоит из смеси мельчайших частиц металла и окислов высокой степени дисперсности. Такой напыленный слой обладает высокой пористостью, которая в среднем достигает 10% объема покрытия. Он хорошо удерживает смазку и отлично работает в условиях граничного трения. Износостойкость покрытий во многом зависит от состава напыляемого материала и способа напыления. Так, износостойкость покрытий из стали во многом зависит от содержания углерода в исходном материале.

Металл, предназначенный для покрытия, расплавляется под воздействием либо пламени смеси горючих газов, либо теплоты, выделяемой электрической дугой или токами высокой частоты. В этой связи различают четыре основных способа напыления: газопламенную, электродугую, высокочастотную и плазменную металлизацию. Выбор способа во многом зависит от вида напыляемого материала. Легкоплавкие материалы целесообразнее напылять газопламенным способом, имеющим меньшую температуру плавления, чем электродуговая металлизация. Однако более высокое качество покрытия при напылении тугоплавких материалов дают электродуговой и плазменный способы. Изменяя в широких пределах состав напыляемого материала и выбирая соответствующий способ нанесения покрытий, можно получать различные свойства покрытия, такие как пористость, твердость, остаточные напряжения, хрупкость, прочность сцепления с основой и др.

В общем случае напыление осуществляют как металлами и сплавами, так и керамикой и пластмассами, которые могут находиться

в виде проволоки, стержней или порошка. Выбор материала для напыления обусловлен требованиями, предъявляемыми к покрытию исходя из служебного назначения деталей. При этом следует учитывать сочетаемость материала покрытия с материалом сопрягаемой детали. Это необходимо для того, чтобы после восстановления более интенсивному изнашиванию подвергалась менее ответственная, менее сложная деталь, которую можно легче либо заново восстановить или заменить новой. Кроме того, требуется учитывать значение коэффициентов термического расширения материалов покрытия и основы, так как при большой разнице коэффициентов охлаждение изделия вызывает разную по величине усадку покрытия и основного металла, что может привести к нарушению их сцепления.

Сущность процесса металлизации состоит в напылении предварительно расплавленного металла на специально подготовленную поверхность детали (подложку) струей сжатого газа или воздуха. Мелкие частицы распыляемого металла достигают поверхности детали в пластическом состоянии, имея большую скорость полета. При ударе о поверхность они деформируются и, внедряясь в ее поры и неровности, образуют покрытие. Естественно, в процессе металлизации часть металла теряется. Величина потерь зависит от материала детали и покрытия, конфигурации и размеров изделия, параметров режима напыления.

Принципиальным отличием процесса напыления от наплавки является то, что частицы материала покрытия в большинстве случаев не сплавляются ни между собой, ни с основным металлом. Хотя имеет место образование сварочных мостиков по контактными поверхностям напыленных частиц. Поэтому прочность сцепления покрытия с основой значительно ниже, чем при наплавке.

Механизация процесса напыления позволяет получать более однородные по свойствам и равномерные по толщине покрытия. Степень возможной механизации работ и вид оборудования определяются формой и габаритами восстанавливаемых деталей. Процесс напыления покрытий на цилиндрические детали механизировать, применяя токарные станки, а на плоские изделия – фрезерные, строгальные и другие станки.

Технологический процесс получения покрытий в общем виде включает предварительную подготовку исходных заготовок; собс-

твенно процесс напыления покрытий; термическую обработку после нанесения покрытий и механическую обработку деталей.

Процесс напыления необходимо проводить на режимах, оптимальных для выбранного способа. Оптимальный режим напыления в основном назначают, исходя из требований получения необходимых эксплуатационных свойств покрытия (износостойкость, контактная жесткость, усталостная прочность и др.) и высокой прочности сцепления покрытия с основным металлом.

#### **4.3.1. Обеспечение качества изделий с покрытиями**

Долговечность деталей с покрытиями может увеличиваться в несколько раз по сравнению с новыми изделиями. Это зависит от эксплуатационных свойств, которые приобретают изделия при различных способах и режимах напыления.

К покрытиям в зависимости от условий эксплуатации изделия предъявляются различные требования. При этом необходимо учитывать, что некоторые требования могут привести к тому, что изделия приобретают наряду с необходимыми свойствами и нежелательные (отрицательные) характеристики. Так, высокая пористость покрытия обеспечивает длительные сроки службы деталей, работающих в условиях трения скольжения со смазочным материалом, но она вредна для покрытий, предназначенных для защиты изделий от коррозии. Износостойкость повышается при мелком распыле частиц металла. Но для получения жаростойких покрытий целесообразен именно крупный распыл. Высокая адгезионная прочность покрытий получается при распылении пластичных материалов. При этом количество включений (окислов, неметаллических соединений) в напыленном слое должно быть минимальным. Наоборот, для получения пористых покрытий желательнее большое количество включений. Но при этом надо иметь в виду, что они приводят к снижению адгезионной прочности покрытия с основным металлом.

Способ подготовки поверхности под напыление опять же зависит от назначения покрытия и от того, какие эксплуатационные свойства необходимо обеспечить у восстановленной детали. Нарезание «рваной» резьбы позволяет обеспечить высокую прочность сцепления при достаточно низкой усталостной прочности, получаемой вследствие образования концентраторов напряжений. Следовательно, такие

детали нельзя эксплуатировать при действии циклических нагрузок. Поэтому для подготовки поверхности деталей, работающих в условиях циклического нагружения, необходимо прибегать к другим способам, таким как поверхностное пластическое деформирование, которое придает высокую усталостную прочность изделиям при несколько сниженной прочности сцепления.

Таким образом, эксплуатационные свойства покрытий должны формироваться в зависимости от условий эксплуатации изделий.

Износостойкость изделий с покрытиями, как правило, повышается за счет лучшего действия смазки. Происходит это вследствие повышенной маслостойкости пористых покрытий, снижающей коэффициент трения скольжения. Напыленные покрытия имеют обычно сложную структуру, в которой частицы с умеренной твердостью соединены с частицами с высокой твердостью. Такой характер структуры является одним из важнейших факторов, способствующих повышению износостойкости.

Установлено, что в основном детали пары трения изнашиваются в момент пуска машин, т. е. в условиях неустановившегося режима работы, когда смазка еще не разделяет сопряженные поверхности. Так, в результате частых запусков и остановок машин некоторые детали за короткий срок разрушаются на 60...70% от величины общего износа.

Величина коэффициента трения одних и тех же поверхностей скольжения может колебаться в десятки раз в зависимости от наличия смазки и состояния поверхностного слоя. Так, коэффициент трения скольжения при отсутствии смазки между трущимися поверхностями повышается до 0,2. При рациональной смазке коэффициент трения может снизиться до 0,001. Наличие масла в порах покрытия, его нагрев при работе пары трения существенно увеличивают несущую способность масляного клина, таким образом снижается вероятность схватывания изделий с покрытиями. Характерно, что улучшение условий работы смазки не только уменьшает износ изделий с покрытиями, но увеличивает долговечность сопряженных деталей. Установлено, что при прекращении подачи смазки детали с пористыми покрытиями толщиной до 5 мм работали в 14 раз дольше, чем такие же детали без покрытий. Получение необходимой пористости осуществляется также путем регулирования параметров

(расстояния от сопла горелки до поверхности детали, давления распыляемого воздуха и др.) режима напыления.

#### *Контрольные вопросы*

1. При каких условиях эксплуатации изделий большая пористость покрытий оказывает положительное влияние на процесс изнашивания?
2. Приведите пример, когда напыление покрытий приводит к тому, что изделия приобретают наряду с необходимыми свойствами и нежелательные характеристики.
3. Повышению какого свойства покрытий способствует крупный распыл?
4. Повышению какого свойства покрытий способствует напыление пластичных материалов?
5. Какая предварительная подготовка поверхностей восстанавливаемых деталей способствует повышению усталостной прочности?

#### **4.3.2. Обеспечение прочности сцепления покрытия с основным металлом**

В процессе эксплуатации деталей, восстановленных напылением, под воздействием внешних (рабочая нагрузка, температура и агрессивная среда) и внутренних (остаточные напряжения) факторов может происходить отслаивание и вспучивание покрытий, в результате чего изделия приходят в негодность. Следовательно, работоспособность и долговечность изделий с покрытиями во многом определяются прочностью сцепления (адгезией) покрытия с основным металлом. Обеспечение высокой прочности сцепления покрытия с основным металлом является одним из принципиальных вопросов при решении задачи восстановления изделий методами напыления. Количественно прочность сцепления оценивается отношением силы, необходимой для отрыва покрытия от основы, к площади контакта их граничных поверхностей.

Необходимо отметить, что прочность сцепления стальных покрытий, напыленных электродуговым способом на стальные детали, достигает небольшой величины (25...30 МПа), хотя и несколько превышающей значения прочности сцепления покрытий, полученных газопламенным напылением (15...20 МПа). Следовательно, повышение адгезионной прочности сцепления является насущной задачей, стоящей перед технологами ремонтных производств.

Прочность сцепления покрытия с основным металлом обусловлена качеством предварительной подготовки поверхности, разницей коэффициентов термического расширения основного и покрывающего металлов и уровнем остаточных напряжений, которые, в свою очередь, находятся в зависимости от многих факторов:

- химического состава, структурного состояния основного и напыляемого материалов;
- размеров и формы изделия;
- характеристик источника нагрева (вида рабочего газа, его расхода, потребляемой мощности, количества расплавляемого в единицу времени материала покрытия);
- расстояния от сопла горелки до поверхности детали, которое определяет температуру материала покрытия и поверхности основного металла при напылении;
- скорости и силы удара, при которых частицы металла оседают на покрываемой поверхности;
- тонкости распыла;
- сочетания теплофизических свойств материалов покрытия и изделия, определяющих усадку слоя покрытия после его нанесения;
- толщины покрытия.

Качество предварительной подготовки поверхности исходной заготовки прежде всего выражается в достижении необходимого механического и физического состояний поверхности, которые обеспечивают надежное сцепление частиц распыленного металла с основным металлом.

Адгезионная прочность покрытия с основой преимущественно обеспечивается механическим сцеплением частиц распыленного металла. При этом молекулярное сцепление граничных слоев покрытия и основы, обусловленное запасенной энергией основного металла, ионные и металлические связи служат лишь дополнением к механическому сцеплению. Следовательно, качество предварительной подготовки исходной заготовки под напыление определяется величиной и характером шероховатости её поверхности. Чем более шероховата и развита поверхность основного металла, тем выше прочность сцепления.

Подготовка поверхностей деталей к металлизации представляет собой совокупность технологических операций, выполняемых

в определенной последовательности. Сначала производят мойку деталей, для того чтобы очистить их поверхности от загрязнений, пленок, окислов, жировых и масляных пятен и продуктов коррозии. Затем для придания детали правильной геометрической формы, удаления следов износа и получения шероховатости, необходимой для удержания напыленного слоя материала, выполняют предварительную механическую обработку резанием. И наконец, обеспечивают защиту смежных поверхностей деталей, не подлежащих металлизации. Однако если перед напылением на поверхности детали обнаружены следы загрязнений, влага, окислы, окалина и т. п., то следует вновь произвести очистку поверхности. Нанесение покрытия следует начинать как можно быстрее после окончания предварительной обработки поверхности, поскольку длительная выдержка активированной поверхности с большой площадью контакта с окружающей средой сопровождается ее интенсивным окислением, снижающим прочность сцепления покрытия с основным металлом. Так, после пескоструйной обработки первый слой следует напылять не позднее, чем через 4 часа, а общая продолжительность времени от окончания пескоструйной обработки до завершения процесса напыления покрытия не должна превышать 8 часов.

Поверхности деталей, подлежащие металлизации, очищают от загрязнений в моечных машинах щетками, промывают в бензине или растворителях, нагревают в печах, пламенем газовой горелки или паяльной лампы. Механической обработкой шлифованием выводят следы износа, устраняют геометрические погрешности формы детали и обеспечивают ее размеры, при которых возможно нанесение покрытий толщиной не менее допустимого значения, обусловленного проявлением технологической наследственности. Использование при этом крупнозернистых (зернистость 60...100) шлифовальных кругов из электрокорунда позволяет получить шероховатость  $R_a$  в интервале 25...100 мкм. На концах цилиндрических поверхностей оставляют буртики и протачивают замки в виде кольцевых канавок (рис. 4.47). Протачивание специальных канавок необходимо для предупреждения возникновения краевого эффекта, обусловленного действием остаточных напряжений растяжения и проявляющегося в выкашивании покрытия по внешнему периметру торцевой поверхности. Получить грубую поверхность под напыление ( $R_a > 25$  мкм) можно также другими технологическими ме-

годами: пескоструйной и дробеструйной обработкой, травлением, обработкой электрической дугой или искрой и др.

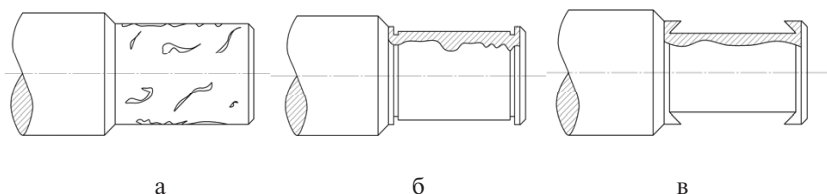


Рис. 4.47. Подготовка цапф под напыление:

*а* — изношенная шейка с местными дефектами; *б* — проточка канавки с наружным буртиком; *в* — проточка замка типа «ласточкин хвост»

Выбор способа подготовки поверхности под напыление осуществляется в зависимости от толщины покрытия и требований к прочности сцепления покрытия, износостойкости и усталостной прочности изделия. Степень механического развития поверхности перед напылением определяет величину минимально допустимой толщины покрытия. Под минимально допустимой толщиной покрытия понимается слой осадков, который перекрывает неровности, полученные в результате предварительной подготовки поверхности, и позволяет обеспечить необходимую точность обработки при проявлении технологической наследственности (при геометрическом копировании) параметров профиля поверхности детали. Она гарантирует получение относительно ровной поверхности покрытия, погрешности которой не будут превышать допустимого значения после механической обработки.

Значение минимально допустимой толщины покрытия не должно быть меньше суммы значений предельно допустимого износа и припуска на последующую механическую обработку.

Одним из наиболее распространенных и эффективных методов развития поверхности под напыление является нарезание «рваной» резьбы. Это делается резцом, установленным с большим вылетом и эксцентриситетом относительно оси детали. Возникающая при резании вибрация резца приводит к образованию микронеровностей поверхности с зазубринами и заусенцами. Окружная скорость детали при нарезании «рваной» резьбы должна быть на 15...20% меньше, чем при обычном точении, а подача, наоборот, больше.



Минимально допустимая толщина покрытия при такой подготовке поверхности должна составлять не менее 0,5 мм. Иногда прибегают к последующей накатке вершин «рваной» резьбы с целью уменьшения допустимой толщины покрытия и создания винтовых полузакрытых каналов в виде ласточкина хвоста. Однако необходимо помнить, что такое дополнительное технологическое мероприятие приводит к увеличению себестоимости восстановленных изделий.

Во многих случаях нарезание «рваной» резьбы заменяют более производительным процессом – накаткой резьбы. При этом некоторое снижение прочности сцепления основного металла с покрытием компенсируется увеличением на 20...25% усталостной прочности самих изделий, что позволяет эксплуатировать их в условиях знакопеременного нагружения.

Песко- и дробеструйные способы обработки позволяют удалить с поверхности исходной заготовки окисные пленки, завальцевать поверхностные дефекты и трещины, а также обеспечить возможность получения покрытий небольшой толщины (0,03 мм). При этих видах обработки формируется небольшая по высоте шероховатость поверхности, а также создаются в поверхностном слое наклеп и остаточные напряжения сжатия, которые способствуют повышению усталостной прочности изделий.

Следует отметить, что остаточные напряжения сжатия основного металла снижают отрицательное влияние на усталостную прочность формирующихся при напылении остаточных напряжений растяжения покрытия. Причем чем выше уровень остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое основы, тем сильнее увеличивается усталостная прочность изделий с покрытиями. Поэтому предварительная подготовка поверхности способами поверхностного пластического деформирования является необходимым условием повышения усталостной прочности восстановленных напылением изделий.

Активация поверхности основного металла при песко- и дробеструйной обработке способствует увеличению диффузии атомов металлического покрытия в основу и тем самым повышает молекулярное сцепление напыляемых частиц.

Пескоструйную обработку производят сухим кварцевым песком с размером частиц 1,5...2,0 мм, которые выдуваются через сопло струей

сжатого воздуха под давлением 0,4...0,6 МПа. Недостатком пескоструйной подготовки поверхности является образующаяся в процессе обработки кремнистая пыль, которая может задерживаться во впадинах микропрофиля поверхности и ослаблять сцепление основы с покрытием.

При дробеструйной обработке используется чугунная или стальная крошка диаметром 0,4...2,0 мм. Причем чем меньше диаметр используемой дроби, тем ниже шероховатость обработанной поверхности. Необходимо отметить, что стальная дробь служит примерно в 30 раз дольше кварцевого песка.

Преимущество песко- и дробеструйных способов заключается в их высокой производительности и возможности обработки поверхностей деталей любой конфигурации.

Подготовка твердой поверхности под напыление покрытия толщиной более 0,5 мм состоит в нарезании винтовых полузакрытых канавок с шагом 2...3 мм или в создании насечкой пневматическим зубилом в шахматном порядке заусенцев (рис. 4.48). Минимально допустимая толщина покрытия после такой подготовки поверхности составляет 0,15 мм.

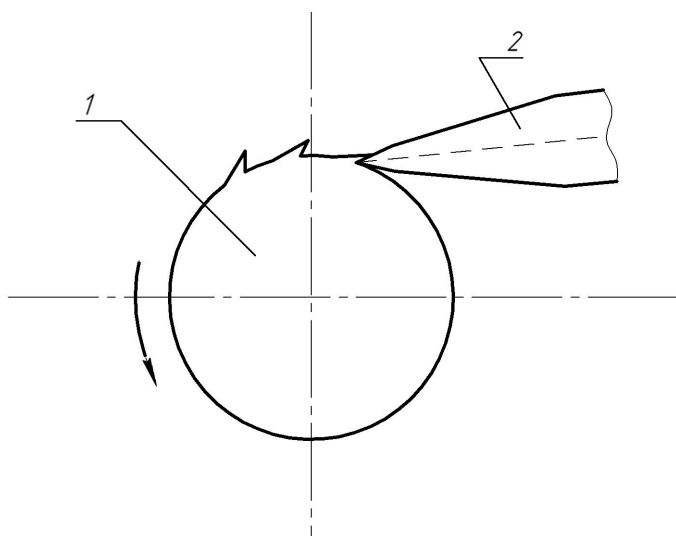


Рис. 4.48. Подготовка поверхности детали под напыление методом насечки пневматическим зубилом: 1 – деталь; 2 – пневматическое зубило

На цилиндрические детали с высокой поверхностной твердостью, которые не поддаются накатке и полноценному нарезанию «рваной» резьбы, обработке песком и насечке зубилом, наматывают очищенную от окалины проволоку диаметром 0,5...1,6 мм с шагом от 3 до 5 ее диаметров. Намотанную проволоку закрепляют сваркой, после чего проводят пескоструйную обработку. Такой способ обработки увеличивает контакт между изделием и слоем напыленного материала и практически не изменяет усталостную прочность изделия. При подготовке восстанавливаемой поверхности путем намотки проволоки толщина напыляемого покрытия должна быть не менее 0,7 мм.

При намотке проволоки прочность сцепления покрытия  $p$  с изделием примерно на 20% больше, чем при пескоструйной обработке ( $p = 35$  МПа), но ниже, чем при дробеструйной обработке ( $p = 104$  МПа). Также прочность такого сцепления ниже, чем при нарезании «рваной» резьбы ( $p = 166$  МПа), с прикаткой вершин ( $p = 144$  МПа) или при накатке шероховатой резьбы ( $p = 100$  МПа). Следует отметить высокую эффективность электроискровой обработки на переменном токе, которая позволяет получить прочность сцепления покрытия с основой  $p = 110$  МПа.

Для повышения прочности сцепления покрытия с основным металлом также прибегают к напылению подслоя из легкоплавких металлов (олова, свинца, цинка, алюминия). Покрытия в качестве подслоя наносят толщиной не более 0,13 мм. Молибденовое покрытие отличается особенно хорошей адгезией к углеродистым сталям. Процесс напыления молибдена сопровождается интенсивным испарением окислов. В результате расплавленные частицы молибдена в момент соударения с поверхностью основного металла имеют достаточно тонкую окисную пленку, которая при ударе легко разрывается, и чистый молибден образует с основой достаточно сильную молекулярную связь.

При значительной разнице коэффициентов термического расширения материалов покрытия и основы стараются выравнять их теплофизические свойства путем нанесения подслоя из материала, величина усадки которого является промежуточной между значениями усадки покрытия и материала исходной заготовки.

Весьма существенное влияние на прочность сцепления покрытия с основой оказывают остаточные напряжения покрытия, которые

образуются в процессе его напыления. Они обуславливают величину и направление внутренней силы, действующей на покрытие. Очевидно, что наиболее напряженным и критическим местом является граничная поверхность между покрытием и основным металлом. Именно здесь происходит нарушение установленных связей напыленного материала с основой. Остаточные напряжения растяжения снижают прочность сцепления, так как стремятся оторвать покрытие от основы, остаточные напряжения сжатия, наоборот, повышают прочность сцепления, поскольку прижимают покрытие к основе. Поэтому при напылении поверхности стремятся создать минимально возможные растягивающие остаточные напряжения, так как при высоких остаточных напряжениях растяжения в покрытии, величина которых будет превышать прочность сцепления покрытия, последнее под их воздействием будет отрываться от основы и сворачиваться в трубочку; если величина напряжений будет превышать временное сопротивление разрыву, то произойдет только растрескивание покрытия. В этой связи предварительный подогрев деталей перед напылением в большинстве случаев повышает прочность сцепления покрытия с основным металлом. Это происходит в результате уменьшения скорости охлаждения материала напыленного покрытия, которое способствует снижению уровня остаточных напряжений растяжения в наращиваемом покрытии. Так, повышение температуры подогрева в интервале от 120 до 250°C может привести к увеличению прочности сцепления практически в 2 раза.

Процесс нанесения покрытий необходимо производить на оптимальных параметрах, позволяющих обеспечить хорошее механическое и молекулярное сцепление покрытия с основой и не допустить образования больших остаточных напряжений растяжения в покрытии.

Получение мелкого распыла металла является неотъемлемым условием обеспечения высокой механической прочности сцепления напыляемых частиц с основой. Максимальный размер напыляемых частиц металла не должен превышать радиус закругления впадин микропрофиля восстанавливаемой поверхности. В этом случае мелкие частицы расплавленного металла при соударении с исходной заготовкой могут беспрепятственно и наиболее полно заполнять поры и микронеровности восстанавливаемой поверхности и образовывать прочные механические связи.

Перегрев поверхности основного металла в процессе напыления также может привести к нарушению сцепления покрытия с основой в результате структурно-фазовых превращений. Так, процесс охлаждения нагретого до высокой температуры основного металла может сопровождаться превращением остаточного аустенита в мартенсит с увеличением удельного объема основного металла, т. е. с его расширением. Происходящая при этом деформация покрытия неизбежно приводит к его отслаиванию и растрескиванию. Поэтому при напылении покрытий должны строго соблюдаться нормы нагрева восстанавливаемых изделий. Температура поверхности основного металла не должна превышать 260°С. Если режим напыления выбран правильно, то при толщине напыленного покрытия 0,5...0,7 мм поверхность основы нагревается до 70°С; при толщине покрытий 2...3 мм и более ее температура достигает 100...150°С.

Для предотвращения перегрева основного металла необходимо регулировать дистанцию напыления (расстояние от сопла металлизатора до поверхности детали) с учетом эффективной мощности источника нагрева, например пламени горючих смесей. Оптимальное расстояние от среза сопла металлизатора до поверхности восстанавливаемой детали не должно выходить за пределы 75...250 мм. При малой дистанции напыления создается опасность образования больших остаточных напряжений и деформаций изделия. При большой дистанции напыления температура и скорость частиц снижаются, что неизбежно приводит к образованию рыхлого покрытия и уменьшению прочности сцепления с основой. Следовательно, выбор оптимальной дистанции напыления должен основываться на знании закона распределения температуры пламени в направлении удаления от сопла металлизатора к поверхности детали. Так, при напылении порошка ацетиленокислородным пламенем, температура которого у самого края сопла составляет 3100°С, температура факела на расстоянии от сопла 60...70 мм примерно равна 2500°С; по мере дальнейшего увеличения расстояния она постепенно снижается: на расстоянии 100 мм от сопла температура составляет 1900°С, на расстоянии 150 мм – 1400°С (рис. 4.49). Такая же закономерность изменения температуры, только с меньшими ее значениями по дистанции, наблюдается при напылении порошка ацетиленовоздушным пламенем, температура которого

у края сопла составляет  $2325^{\circ}\text{C}$ . Совершенно иная закономерность изменения температуры при напылении проволоки. Быстрое снижение температуры начинается уже у самого края сопла металлизатора и нарастает по мере увеличения расстояния. Так, на расстоянии 150 мм температура пламени составляет всего  $200^{\circ}\text{C}$ .

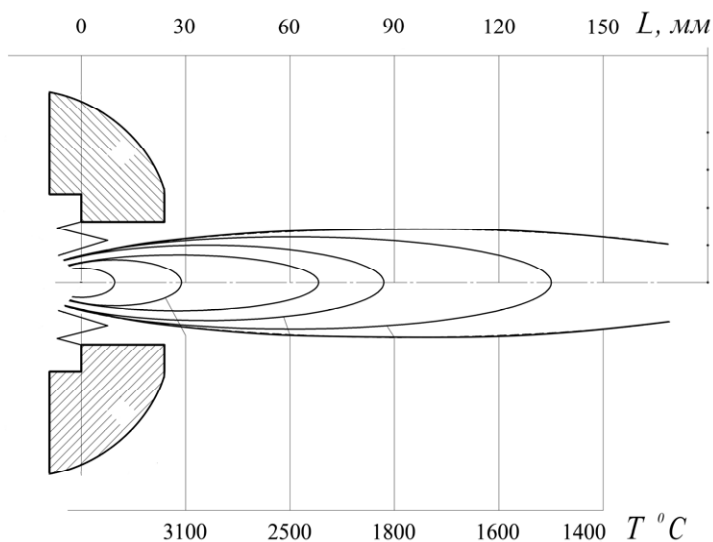


Рис. 4.49. Распределение температуры ацетиленоxygenного пламени по длине факела

Температура и скорость частиц напыляемого материала оказывают большое влияние на их молекулярное сцепление с основным металлом. Скорость, с которой частицы достигают поверхности изделия, должна быть достаточной, чтобы обеспечить значительную силу удара, необходимую для их расплющивания и разрушения окислов. Увеличение температуры напыляемых частиц металла способствует возрастанию площади их контакта при соударении с поверхностью основы. Только при достаточной площади контакта могут возникать прочные молекулярные связи.

Увеличение давления распыляемого воздуха и угла атаки частиц способствует возрастанию силы удара. Наибольшая деформация на-

пыляемых частиц при соударении с поверхностью детали происходит, если ось металлизатора находится перпендикулярно к поверхности заготовки. Уменьшение угла атаки приводит к снижению деформации напыляемых частиц. При этом допустимое отклонение оси металлизатора от вертикали возможно не более чем на  $45^\circ$ .

Для уменьшения нагрева исходной заготовки покрытие наносят тонкими слоями на отдельные участки. Причем напыление детали начинают на участках с резкими переходами, углами, галтелями, уступами, а затем осуществляют металлизацию всей поверхности, равномерно наращивая металл. Последовательным наслаиванием расплавленного металла можно получить покрытие, толщина которого может быть от нескольких микрон до 10 мм (обычно для тугоплавких материалов толщина покрытия составляет 1,0...1,5 мм и для легкоплавких металлов – 2,5...3,0 мм). Однако чем больше толщина покрытия, тем выше уровень остаточных напряжений растяжения, тем ниже прочность сцепления с основой (рис. 4.50).

Для повышения прочности сцепления покрытия с основным металлом особенно эффективен последующий нагрев восстанавливаемой детали, например, токами высокой частоты с целью оплавления покрытия. Это мероприятие также позволяет значительно повысить физико-механические свойства материала покрытия.

Следует отметить, что срок службы изделий, восстановленных металлизацией, может быть в 1,2...4 раза дольше, чем обычных деталей.

#### *Контрольные вопросы*

1. Почему долговечность восстановленных деталей во многом зависит от прочности сцепления покрытия с основным металлом?
2. Какие факторы определяют прочность сцепления покрытия с основным металлом?
3. Как качество предварительной подготовки поверхностей деталей влияет на прочность сцепления покрытия с основным металлом?
4. Какие способы предварительной подготовки поверхностей деталей вы знаете?
5. Какие требования предъявляются к технологическим параметрам процесса напыления покрытий для того, чтобы обеспечить высокую прочность сцепления покрытия с основным металлом?

6. Почему остаточные напряжения растяжения снижают прочность сцепления покрытия с основным металлом?

### 4.3.3. Способы восстановления деталей напылением

Газопламенное напыление применяют для восстановления изношенных поверхностей ответственных деталей автомобиля, которые эксплуатируются в тяжелых условиях. В частности, газопламенным напылением восстанавливаются изношенные кулачки распределительных валов, шейки коленчатых валов, рабочие поверхности выпускных клапанов и др.

При газопламенном напылении нагрев напыляемого материала (порошок, проволока, пруток) осуществляют теплотой сгорания смеси горючего газа с кислородом и распыление проводят струей сжатого воздуха, находящегося под давлением 0,6 МПа (рис. 4.51). При этом сжатый воздух должен быть очищен от примесей масла и влаги. Для его очистки применяются специальные фильтры (маслоотделители) поглощающего типа.

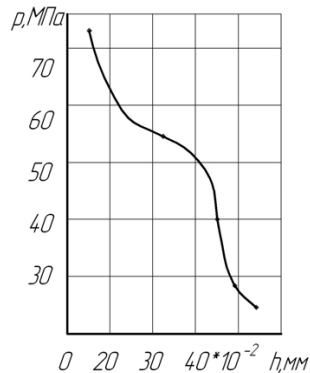


Рис. 4.50. График зависимости прочности сцепления  $p$  покрытия с основным металлом от толщины  $h$  слоя покрытия

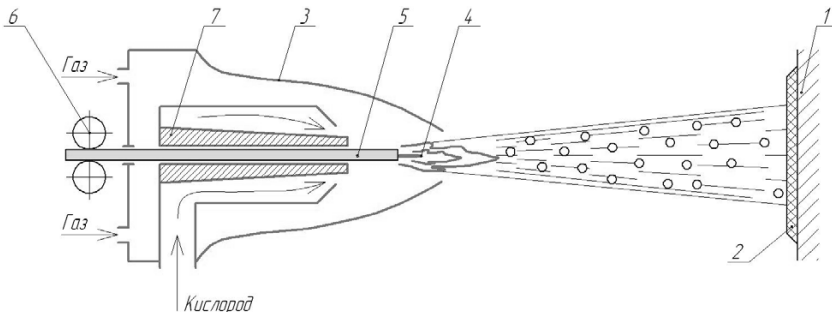


Рис. 4.51. Схема газопламенного напыления: 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – покрытие; 3 – сопло горелки; 4 – пламя; 5 – присадочная проволока; 6 – механизм подачи проволоки; 7 – скользящий контакт



При напылении порошком используют горелки для газопорошкового напыления, которые при механизированной металлизации крепят на суппорте токарного станка. Конструкция этих горелок аналогична конструкции сварочных горелок (рис. 4.52), но отличается от них принципом работы и наличием бункера для порошкового материала. Порошок из бункера через клапан, размещенный в корпусе горелки, под действием инжекторного эффекта, создаваемого потоком кислорода и горючего газа, всасывается в сопло горелки, где разгоняется газовым потоком до большой скорости. На выходе из сопла порошок попадает в пламя, в котором он разогревается до вязкотекучего состояния. Увлекаемые газовым потоком частицы порошка наносятся на предварительно подготовленную восстанавливаемую поверхность.

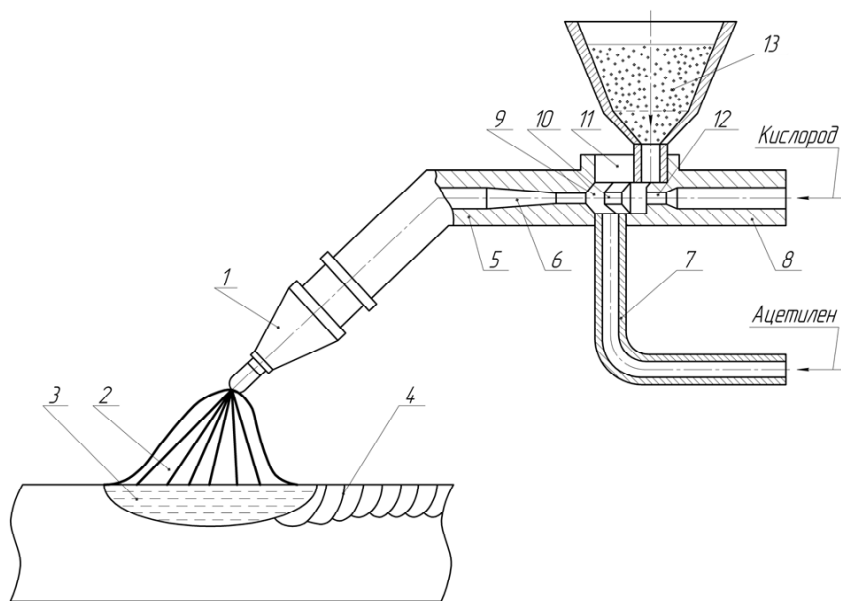


Рис. 4.52. Устройство сварочной горелки: 1 – мундштук; 2 – пламя; 3 – сварочная ванна; 4 – наплавленный слой; 5 – трубка; 6 – канал; 7 – ацетиленовая трубка; 8 – кислородная трубка; 9 – камера смешивания; 10, 12 – инжекторы; 11 – смесительная камера; 13 – порошок

В зависимости от материала детали и условий её эксплуатации после напыления иногда проводят оплавление покрытия. В основном это делается для покрытий из самофлюсующихся сплавов. Оплавление

ние газовой горелкой позволяет уменьшить пористость покрытия, повысить прочность его сцепления с основным металлом и прочность сцепления между самими частицами покрытия (когезию). Восстановленные таким образом детали обладают высокой коррозионной стойкостью, износостойкостью против абразивного изнашивания и хорошо работают в условиях высоких рабочих температур. Газопламенное напыление с последующим оплавлением дает возможность восстанавливать детали с износом более 2,5 мм.

Для получения покрытия равномерной толщины необходимо, чтобы толщина напыляемого слоя за один проход не превышала 0,25 мм. В этой связи толстые покрытия необходимо напылять за несколько проходов.

Технологический процесс газопламенного нанесения покрытий в основном состоит из четырех этапов:

- 1) предварительный нагрев поверхности детали до температуры 200...250°С;
- 2) нанесение подслоя, который дает основу, необходимую для наложения слоев покрытия;
- 3) нанесение основных слоев, позволяющих получить покрытие с необходимыми физико-механическими свойствами;
- 4) последующий нагрев восстанавливаемой детали, например, токами высокой частоты с целью оплавления покрытия.

*Преимущества газопламенного напыления:*

- высокая производительность процесса нанесения покрытий;
- локальность обработки;
- незначительное термическое воздействие на подложку;
- возможность нанесения покрытий на изделия больших размеров;
- отсутствие ограничений на сочетание материалов покрытия и подложки.

*Недостатки газопламенного напыления:*

- относительно высокая стоимость покрытия;
- сложность установки для газопламенного напыления, включающей кроме газовой горелки устройства для очистки сжатого воздуха, источники горючего газа и кислорода.

Электродуговое напыление характеризуется высокой производительностью и экономичностью. При электродуговом напылении

создаваемая температура нагрева (более  $4000^{\circ}\text{C}$ ) напыляемого материала выше, чем при напылении порошка ацетиленокислородным пламенем ( $3100^{\circ}\text{C}$ ), что позволяет наносить на восстанавливаемые поверхности тугоплавкие материалы. Кроме того, электродуговой металлизацией на переменном токе, обеспечивающей крупный распыл, можно получать жаростойкие покрытия.

В авторемонтном производстве электродуговой способ напыления реализуется переносными (ручными) металлизаторами проволочного типа. Во время их работы механизм подачи перемещает через скользящие электрические контакты две изолированные электродные проволоки (рис. 4.53). На выходе из наконечников проволоки сближаются, и между ними создается электрическая дуга, которая мгновенно расплавляет металл. Струя сжатого воздуха под давлением  $0,6\text{ МПа}$  распыляет расплавленный металл на мельчайшие частицы и наносит их на предварительно подготовленную восстанавливаемую поверхность детали.

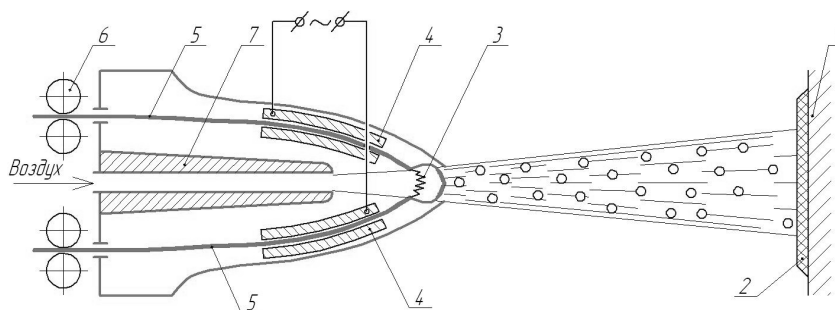


Рис. 4.53. Схема электродугового напыления: 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – покрытие; 3 –электрическая дуга; 4 – скользящий контакт; 5 – присадочная проволока; 6 – механизм подачи проволоки; 7 – сопло для подачи воздуха

Производительность электродуговых металлизаторов и качество покрытий при работе на постоянном токе выше, чем на переменном. Это обусловлено отсутствием пульсации электрической дуги, которая возникает при работе на переменном токе. При электродуговом напылении на постоянном токе процесс протекает стабильно, обеспечивая получение покрытия с мелкозернистой структурой. Поэтому в большинстве случаев для электродугового напыления применяют

источники постоянного тока со стабилизаторами напряжения.

При использовании в качестве электродов проволок из двух разных металлов можно получить покрытие из их сплава, так называемый псевдосплав. Для нанесения антифрикционных покрытий из псевдосплавов (стале-медных, стале-алюминиевых, стале-медно-свинцовых и др.) применяют трехпроволочные электродуговые металлзаторы, которые позволяют одновременно расплывать два или три различных металла. Такие покрытия из недефицитных металлов отличаются высокими антифрикционными свойствами и используются вместо специальных баббитов или бронз.

Высокочастотная металлизация основана на использовании принципа индукционного нагрева. При перемещении сварочной проволоки в переменном электромагнитном поле, создаваемом специальной катушкой-индуктором, в ней индуцируются вихревые токи (рис. 4.54). Эти токи вызывают постепенный нагрев материала проволоки по мере её продвижения, но полное расплавление напыляемого материала происходит при помощи концентратора вихревых токов уже на выходе из головки металлзатора. Транспортировка расплавленных частиц металла к напыляемой поверхности осуществляется потоком сжатого воздуха.

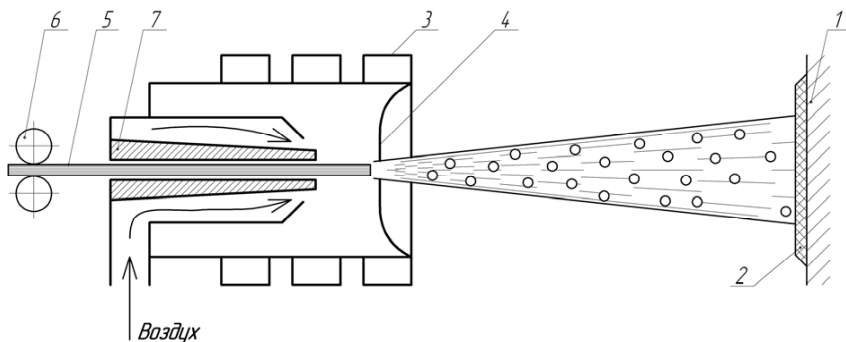


Рис. 4.54. Схема высокочастотной металлизации:

- 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – покрытие; 3 – индуктор;
- 4 – концентратор вихревых токов; 5 – присадочная проволока;
- 6 – механизм подачи проволоки; 7 – скользящий контакт

Возможность управления температурой нагрева сварочной прово-

локи с помощью вихревых токов позволяет свести к минимуму выгорание легирующих элементов и снизить окисление металла проволоки.

Следует отметить недостаточно высокие адгезионные свойства стальных покрытий (25 МПа), напыленных этим способом. В этой связи высокочастотная металлизация не рекомендуется для восстановления деталей, работающих при трении без смазочных материалов.

В последнее время всё большее применение в ремонтном производстве находит плазменное напыление. Сверхвысокие температуры плазменного напыления (плазменная струя имеет температуру 10000...35000°С) позволяют наносить тугоплавкие материалы, напылять материалы без их разложения, получать покрытия без окислов, наносить многослойные покрытия с высокой (до 98%) плотностью и обеспечивать большую прочность сцепления покрытия с основным материалом, в том числе с пластмассой и деревом. Благодаря небольшому нагреву подложки при этом способе нанесения покрытий практически отсутствует коробление изделий.

Плазменное напыление основано на способности газов при определенных условиях переходить в состояние плазмы.

При возбуждении электрической дуги между неплавящимися вольфрамовыми электродами плазмотрона (рис. 4.55) и под действием повышенного давления плазмообразующего газа (аргона, гелия или их смесей с водородом) происходит его ионизация, т. е. образуется плазма. Плазма, представляющая собой интенсивный поток частично или полностью ионизированного газа, обладает высокой электрической проводимостью, которая способствует устойчивому горению дуги и вытягиванию плазменной струи, в результате чего она принимает вид столбика. После образования плазмы напыляемый материал вместе с транспортирующим его газом подается в небольшое отверстие вблизи выхода из сопла, т. е. вдувается в наиболее высокотемпературную область плазменной струи. Напыляемый материал, приготовленный в виде мелкодисперсного порошка (размеры частиц составляют 40...70 мкм), проходя с высокой скоростью через высокотемпературную плазму, успевает нагреться в основном лишь до пластического состояния. Однако благодаря высокой скорости течения плазменной струи (2000 м/с) частицы порошка приобретают значительную кинетическую энергию, с которой соударяются с восстанавливаемой по-

верхностью. При ударе о поверхность они расплющиваются и, внедряясь в ее поры и неровности, образуют покрытие. Выделяющаяся при соударении теплота обеспечивает оплавление и прочное сцепление частиц между собой и с поверхностью исходной заготовки.

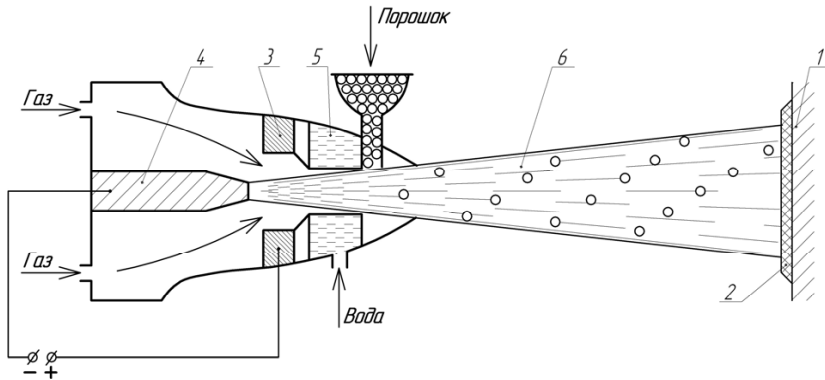


Рис. 4.55. Схема плазменной металлизации: 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – покрытие; 3 – анод; 4 – катод; 5 – водоохлаждаемое сопло; 6 – плазма

При плазменном напылении следует выдерживать оптимальное расстояние от среза сопла до поверхности изделия, величина которого зависит от параметров режима напыления, материала покрытия и исходной заготовки и изменяется в интервале 80...120 мм.

В настоящее время для плазменного нанесения покрытий широко используется высокотехнологичное оборудование фирмы «Метко» (США). Одной из последних разработок этой фирмы является универсальная плазменная установка марки «Метко 7М». Установка снабжена плазменным распылителем со сменными узлами для нанесения покрытий в ручном и механическом режиме на наружную или внутреннюю поверхности изделий. Шкаф управления установки, имеющий все необходимые приборы для контроля за процессом напыления, обеспечивает синхронное включение установки в такт подачи детали. Используемый плазмотрон «Метко 7МБ» имеет сопло специальной конфигурации для создания сверхзвуковой струи, которая образует в зоне напыления динамический вакуум.

В качестве недостатка плазменной металлизации необходимо

отметить достаточно большую стоимость и сложность конструкции реального плазмотрона. Она содержит полости для циркуляции дистиллированной воды, охлаждающей нагреваемые части сопла, устройства для регулирования дуги и подачи напыляемого порошка. Также к недостаткам плазменной металлизации следует отнести наличие сильного шума во время напыления. Шум возникает вследствие генерации активных звуковых колебаний, обусловленных большой скоростью истечения плазменной струи.

*Преимущества металлизации напылением:*

- возможность получения пористого покрытия, хорошо впитывающего смазку и обеспечивающего работу сопряжений трущихся деталей в режиме масляного голодания;
- малый нагрев восстанавливаемой детали и, как следствие, отсутствие ее коробления и изменения свойств, полученных при термобработке;
- возможность получения разнообразного состава напыляемого слоя, включая износостойкие твердосплавные составляющие – карбиды титана, бора и т. п.

*Недостатки восстановления деталей металлизацией:*

- склонность напыленного слоя к отслоению от поверхности основного металла заготовки вследствие недостаточной адгезионной прочности;
- высокие требования к качеству подготовки поверхности детали под напыление (требуется тщательное обезжиривание, создание особого микрорельефа поверхностей, активация материала поверхностного слоя дробе- и пескоструйной обработкой непосредственно перед нанесением покрытия);
- снижение усталостной прочности деталей;
- высокие требования к поддержанию на заданном уровне технологических параметров процесса напыления.

Каждый из газотермических способов нанесения упрочняющих и защитных покрытий имеет свою область применения. Так, если электродуговая металлизация и газопламенное напыление могут быть эффективно использованы в мелкосерийном ремонтном производстве, то плазменную металлизацию целесообразно применять на крупных ремонтных предприятиях.

### *Контрольные вопросы*

1. Какие основные способы напыления покрытий вы знаете?
2. Какими отличительными особенностями обладает электродуговая металлизация?
3. В чем заключается сущность газопламенного напыления покрытий?
4. Какие преимущества имеет способ газоплазменного напыления покрытий?
5. Какой вид тепловой энергии используется для расплавления напыляемого материала при высокочастотной металлизации?

#### **4.3.4. Способы модификации покрытий и новые виды напыления**

В настоящее время прослеживается устойчивая тенденция к улучшению структуры и свойств газотермических покрытий комбинированными методами и дополнительными обработками. Например, комбинированный способ плазменного напыления, в котором процесс нанесения покрытий совмещен с ультразвуковой обработкой, позволяет через совершенствование структуры напыленного материала повысить прочность и твердость покрытия, а также снизить пористость и уровень остаточных напряжений растяжения.

В ремонтном производстве осваиваются способы изостатического, гидростатического, детонационного прессования напыленных покрытий. К этим способам также можно отнести способ «Hi-Rac», при котором напыленное покрытие подвергается газостатическому сжатию. В результате такого прессования напыленного материала снижается пористость и повышается когезионная и адгезионная прочность покрытий.

Лазерное и электронно-лучевое упрочнение нанесенных покрытий дает возможность на порядок повысить прочность их сцепления с основой за счет оплавления, а также увеличить твердость и прочность напыленного металла путем создания упорядоченной мелкоблочной структуры. Повышение качества покрытий модифицированием нанесенного материала можно также производить ионно-лучевой обработкой, сущность которой заключается в бомбардировке поверхности пучком ионов и легировании металла практически любыми химическими элементами.

Изложенное выше показывает, что с целью повышения качества



покрытий процесс их нанесения идет по пути усложнения за счет введения дополнительных технологических мероприятий и обработок. Это, безусловно, положительная тенденция в развитии процесса нанесения покрытий, хотя приводит к некоторому удорожанию технологии восстановления.

Одним из путей развития технического потенциала авторемонтных предприятий является применение наряду с традиционными новых экономичных способов напыления, обеспечивающих высокое качество ремонтно-восстановительных работ. В этом отношении очень перспективным является газодинамический способ напыления покрытий. Этот способ применяют для восстановления геометрических размеров изношенных деталей; для заделки прогаров, коррозионных повреждений, промоин в головках блоков цилиндров и в самих блоках; для ремонта трещин и прогаров в камерах сгорания и других узлах; для герметизации зон утечки в системах автомобильных кондиционеров; для устранения дефектов в радиаторах, изготовленных из различных металлов; для нанесения антикоррозионных металлических покрытий на отдельные участки (например, на сварные швы) кузова и различных агрегатов.

Газодинамическое напыление относится к «холодным» динамическим способам нанесения покрытий, так как в процессе напыления частицы порошкового материала не нагреваются выше температуры 200...300°С, т. е. находятся в твердом состоянии. При этом процесс наращивания покрытий не требует применения горючих или опасных газов.

Газодинамический способ напыления основан на использовании высокой кинетической энергии напыляемых частиц, разгоняемых до сверхзвуковой скорости (свыше 700 м/с) газовым потоком. В большинстве случаев для ускорения частиц используют очищенный сжатый воздух. Он подается под высоким давлением (0,6...1,0 МПа) на вход сверхзвукового сопла (рис. 4.56). Для увеличения скорости воздушного потока и, следовательно, скорости частиц напыляемого порошка подводимый воздух подогревается нагревательными элементами до температуры 300...400°С. Напыляемый материал через отверстие, находящееся вблизи выхода из сопла, под действием инжекторного эффекта попадает в поток воздуха и переносится им к восстанавливаемой поверхности. При соударении частиц порошка

металла, обладающих огромной кинетической энергией, с поверхностью детали происходят своего рода микровзрывы, в результате которых частицы достаточно сильно деформируются и внедряются в основной металл. Внедрившиеся в поверхность заготовки частицы подвергаются дополнительным ударам со стороны следом летящих частиц, которые вызывают дополнительную пластическую деформацию, перемещающую их еще глубже в основной металл.

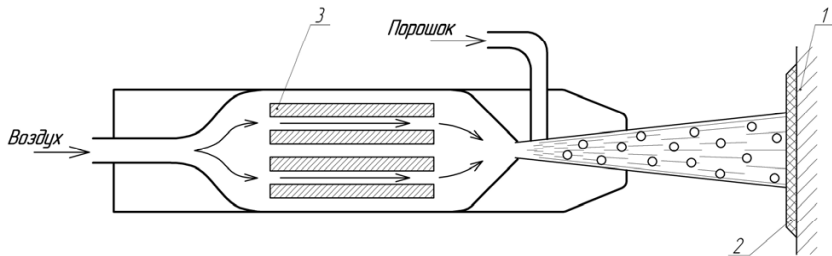


Рис. 4.56. Схема газодинамического напыления: 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – покрытие; 3 – нагревательные элементы

В случае напыления порошка, состоящего из двух компонентов, один из которых – пластичный металл, а второй – твердый материал (например, керамика), более твердые частицы благодаря эрозионному воздействию очищают поверхность исходной заготовки от загрязнений и увеличивают степень деформации пластичных частиц порошка, повышая тем самым в 1,5...2 раза адгезионные свойства покрытия.

Газодинамический способ позволяет получить плотные композиционные покрытия, обладающие высокой износостойкостью и прочностью.

На практике способ газодинамического напыления покрытий реализуется промышленными установками «Димет», разработанными Обнинским центром порошкового напыления, которые благодаря возможности локализованного напыления позволяют во многих случаях исключить аргонодуговую сварку для устранения различных дефектов.

*Преимущества газодинамического напыления:*

- процесс напыления происходит на воздухе при обычных условиях;
- процесс напыления не сопровождается опасными излучениями и агрессивными выделениями;
- возможность получения износостойких композиционных покрытий;

- возможность получения покрытий с высокой плотностью и статической прочностью;
- возможность получения покрытий с высокой прочностью сцепления с основным металлом;
- малый нагрев восстанавливаемой детали (температура на поверхности не превышает 150°C), который не приводит к образованию значительных деформаций;
- отсутствие высокотемпературных потоков и, как следствие, отсутствие окисления материала покрытия.

В настоящее время в ремонтную практику начинают внедряться новые методы нанесения покрытий, среди которых выделяются электрофизические способы получения тонких покрытий, обладающих повышенной износо-, жаро- и фреттингстойкостью. Среди них выделяются вакуумные ионно-плазменные методы. Они основаны на плазмо-химических реакциях наносимого материала с ионами рабочего газа или специально вводимых в рабочую камеру добавок.

Одним из самых известных электрофизических способов является способ КИБ (способ получения ионно-плазменных покрытий путем конденсации вещества из плазменной фазы в условиях ионной бомбардировки), применяется для повышения износостойкости поверхностей деталей, работающих в условиях трения скольжения. Он реализуется на установках марки «Булат» с помощью плазменных ускорителей и электродуговых испарителей, принцип действия которых основан на едином методе генерации вещества. Электродуговые испарители и плазменные ускорители, позволяющие получать высокую степень ионизации (близкую к 100%) плазменного потока, наиболее эффективны при нанесении тугоплавких материалов.

Основным недостатком электродуговых испарителей является наличие в плазме микрочастиц в виде капель и твердых осколков материала катода – так называемой «капельной фазы». Для отделения капельной фазы от плазменного потока применяют систему его сепарирования, позволяющую получать покрытия без микроскопических дефектов, обусловленных наличием в исходной плазме макроблоков материала катода.

Процесс нанесения покрытий включает предварительную ионную

очистку поверхности и конденсацию покрытия.

Очистка поверхности исходной заготовки осуществляется бомбардировкой ее ионами плазмообразующего материала катода, дополнительно ускоренными благодаря приложенному к заготовке отрицательному потенциалу порядка 1...2 кВ. Ионы материала катода, образующиеся в результате электродугового разряда, ускоряются под действием высоковольтного потенциала и выбивают с очищаемой поверхности атомный поверхностный слой. При ионной очистке происходит интенсивное распыление, травление, активация поверхностных слоев, что обеспечивает высокую адгезию покрытия к специально подготовленной поверхности детали.

Конденсация покрытия начинается после ионной очистки при снижении потенциала подложки до 25...200 В. В рабочую камеру подается легирующий газ (например, азот), в атмосфере которого и происходит осаждение испаряемого материала катода. В результате взаимодействия материала катода с атомами легирующего газа на поверхности детали образуется покрытие, содержащее нитрид материала катода, например, нитрид титана  $TiN$ . Свойства получаемых покрытий зависят от технологических параметров процесса осаждения: температуры подложки при конденсации; давления активного газа; энергии и плотности потока ионов. Изменяя эти технологические параметры, можно получить разный состав и структуру покрытия.

Необходимо отметить, что при напылении способом КИБ толщина покрытия растет практически прямо пропорционально времени конденсации. Оптимальная толщина покрытия составляет 6...8 мкм. При этом получают ровные и гладкие покрытия, изменяющие исходную точность размеров детали не более чем на 0,2...0,5 мкм. Восстановление ионно-плазменными покрытиями изношенных плунжеров насосов высокого давления позволяет повысить их износостойкость в 5...8 раз.

Однако при эксплуатации деталей с ионно-плазменными покрытиями в условиях знакопеременных и ударных нагрузок происходит разрушение контактных поверхностей. Это обусловлено высокой твердостью покрытий. Поэтому наряду с высокой твердостью покрытия должны обладать достаточным запасом пластичности и вязкости. Сочетание этих свойств может быть достигнуто последовательным нанесением нескольких слоев из соответствующих материалов.

Детонационный способ применяется для восстановления изно-

шенных поверхностей коренных и шатунных шеек коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания, а также любых тел вращения. Этим способом можно наносить износостойкие покрытия на внешние поверхности цилиндрических деталей диаметром до 1000 мм и на внутренние поверхности диаметром более 15 мм. Особенно эффективен способ для нанесения покрытий на детали сложной конфигурации, которые работают в условиях ударных нагрузок, больших давлений, высоких температур и агрессивных сред.

При детонационном напылении для нагрева и разгона напыляемого порошкового материала используют энергию газового взрыва. Покрытие наносят детонационной пушкой (рис. 4.57), в водоохлаждаемый ствол которой подается взрывчатая газовая (например, ацетиленокислородная) смесь и впрыскивается напыляемый порошок. Ацетиленокислородная смесь воспламеняется при помощи электрического импульса свечи зажигания, и детонационная волна перемещается по стволу, нагревая порошковый материал до температуры 4000°С и разгоняя частицы до скорости 800...1000 м/с.

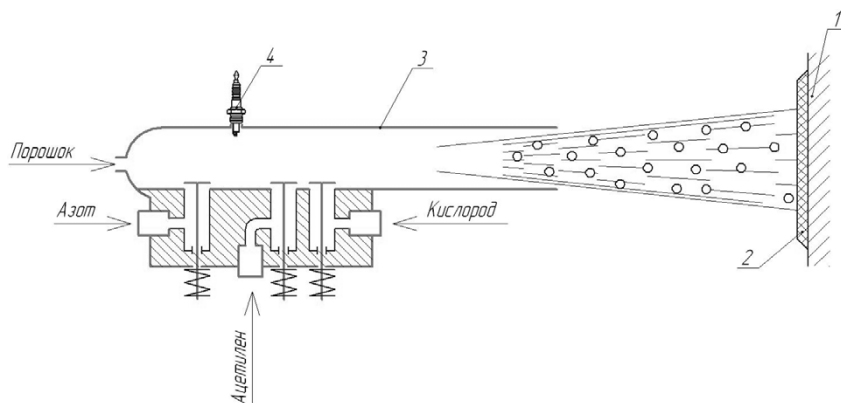


Рис. 4.57. Схема детонационного напыления: 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – покрытие; 3 – ствол; 4 – свеча зажигания

При нанесении покрытия этим способом нагрев обрабатываемой детали, совершающей поступательное или вращательное движение, не превышает 250°С и не приводит к значительным деформациям.

Необходимо отметить, что один только взрыв (цикл) ацетилено-

кислородной смеси, который продолжается в среднем 0,23 секунды, позволяет нанести на поверхность детали слой толщиной не более 0,007 мм. Поэтому более толстые покрытия (0,4...1,0 мм) получают путем проведения серии последовательных взрывов. При соударении с большой силой частиц порошка с поверхностью детали образуются мостики микросварки, которые позволяют получить высокую прочность сцепления покрытия с подложкой.

Для детонационного напыления применяют порошки из карбидов титана и вольфрама, оксидов алюминия и хрома, а также порошки кобальта, хрома, титана и вольфрама. Многослойные покрытия из этих порошков имеют большую твердость, малую пористость (1%) и очень высокую износостойкость.

Детонационный способ за счет формирования поверхностного слоя с особыми свойствами позволяет существенно повысить эксплуатационный ресурс восстановленных деталей.

Поверхностное легирование позволяет восстанавливать отдельные изношенные участки детали и поверхность изделия в целом. Высокие эксплуатационные свойства восстановленных поверхностей обеспечивают их работу в самых тяжелых условиях нагружения. Возможность управления при легировании элементным составом покрытия позволяет значительно сэкономить дорогостоящие присадочные материалы.

Одним из простых и доступных с технологической точки зрения способов поверхностного легирования является электроискровой. Он основан на использовании импульсных электрических разрядов между электродами в газовой среде. Сущность процесса состоит в том, что в межэлектродном зазоре происходит разрушение легирующего материала анода, а продукты разрушения (эрозии) переносятся на восстанавливаемую деталь, которая является катодом (рис. 4.58). При правильном выборе материала анода на поверхности исходной заготовки в результате обработки образуется упрочненный слой высокой твердости и износостойкости.

Процесс электроискрового легирования ведется на низком (4...9 В) напряжении переменного тока под слоем воды или с подачей воды в зону нанесения покрытия. В качестве источника тока используют сварочные трансформаторы с секционированной вторичной обмоткой, что позволяет обеспечивать ступенчатое изменение напряжения, не-

обходимое для работы на разных (мягких и жестких) режимах.

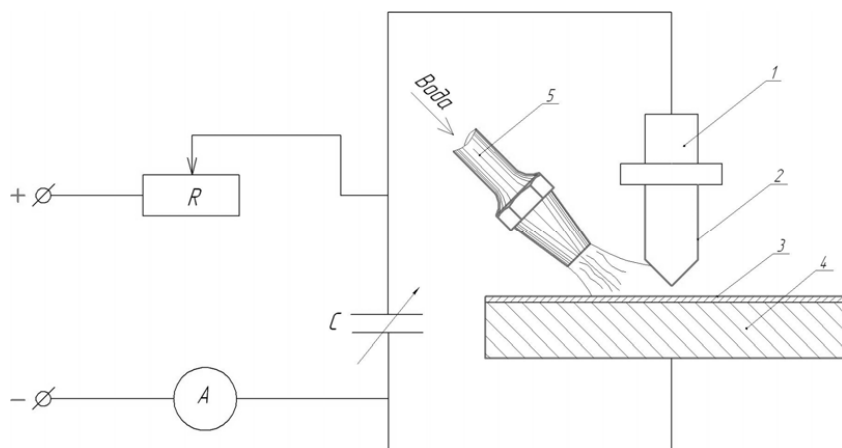


Рис. 4.58. Схема электроискрового нанесения покрытия:

1 – графитовая пластина; 2 – электрод (анод); 3 – упрочняемая поверхность;  
4 – исходная заготовка (катод); 5 – сопло для подачи воды

При электроискровом легировании происходят следующие физические процессы:

- перенос материала электрода, находящегося в газообразном состоянии в разрядном промежутке, на поверхность заготовки;
- диффузия металла анода (упрочняющего электрода), находящегося в газообразном состоянии, в расплав металла катода (упрочняемой детали) в месте разряда;
- образование твердых растворов и мелкодисперсных карбидов в результате быстрого затвердевания жидкой фазы и точечной закалки с огромными скоростями охлаждения.

Среди достоинств электроискрового легирования, таких как локальность, малый расход энергии, отсутствие объемного нагрева детали (глубина термического воздействия на материал детали составляет 0,8...1,0 мм), следует отметить простоту процесса и, как следствие, поддержание технологических параметров обработки на оптимальном уровне. Однако для восстановления поверхностей трения электроискровая обработка применяется редко, поскольку образующаяся шероховатость не удовлетворяет требованиям, предъявляемым

к сопрягаемым поверхностям. К недостаткам также можно отнести и то, что легированный слой имеет диффузионный характер и его характеристики в значительной мере определяются свойствами материала подложки. Поэтому износостойкие покрытия, нанесенные на пластичную подложку, отличаются недолговечностью вследствие их высокой хрупкости.

#### *Контрольные вопросы*

1. Для чего проводят модификацию покрытий при восстановлении деталей?
2. Какие новые способы нанесения покрытий вы знаете?
3. Каким преимуществом обладает способ газодинамического напыления покрытий по сравнению с газотермическими методами нанесения покрытий?
4. В чем заключается сущность процесса нанесения ионно-плазменных покрытий методом КИБ?
5. За счет чего обеспечивается высокая адгезионная прочность покрытий, полученных детонационным методом?

#### **4.4. Восстановление деталей путем нанесения гальванических и химических покрытий**

Для восстановления деталей автомобилей – шкворней поворотных кулаков, осей тормозных колодок, разжимных кулаков тормозных колодок, валов сошки рулевого управления и др., у которых величина износа не превышает 0,15...0,4 мм, целесообразно использовать гальванические покрытия, например осадки на основе хрома, железа или никеля.

Гальванические покрытия получают путем осаждения металла на изношенную поверхность деталей из водных растворов солей при прохождении через раствор электрического тока. Под воздействием электрического тока молекулы соли разлагаются на положительно заряженные ионы металла и отрицательно заряженные ионы кислотного остатка. Ионы электролита двигаются к электродам, ионы металла (катионы) перемещаются к катоду, а ионы кислотного остатка (анионы) – к аноду (рис. 4.59). В результате катодного восстановления металла на изношенной детали получают гальванические ме-



галлические покрытия. Электролитическое осаждение металла может осуществляться с растворимыми (железные, медные) или нерастворимыми анодными пластинами (хромирование).

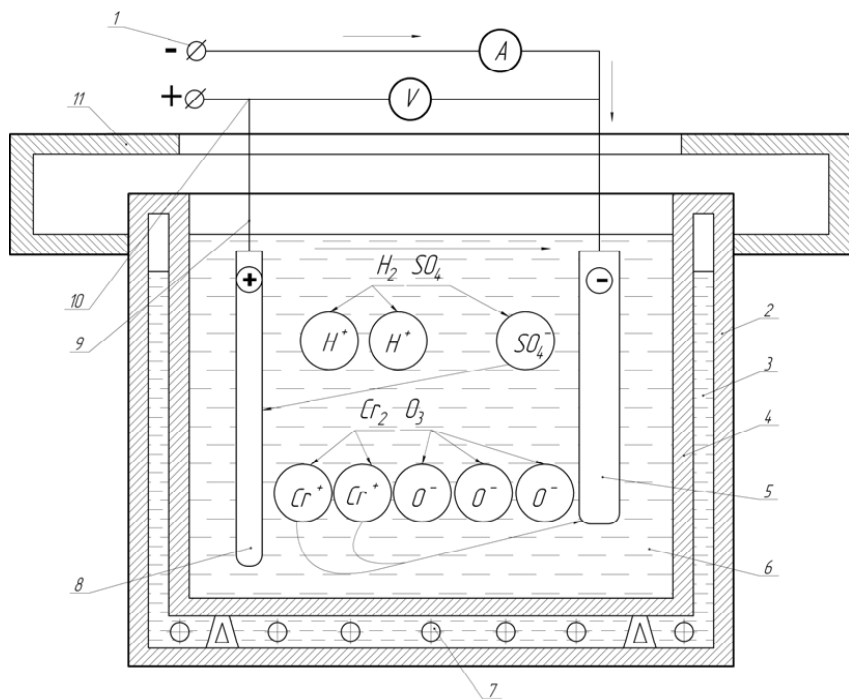


Рис. 4.59. Схема электролитического осаждения покрытия:

- 1 – электрическая шина катода; 2 – наружная стенка ванны;
- 3 – вода для подогрева электролита в ванне; 4 – внутренняя стенка ванны;
- 5 – катод – восстанавливаемая деталь; 6 – электролит;
- 7 – термоэлектрический нагреватель; 8 – анод – свинцовая пластина;
- 9 – подвеска; 10 – электрическая шина анода; 11 – крышка ванны

Качество гальванических покрытий в основном зависит от состава электролита, плотности тока, температуры электролита и интенсивности его перемешивания в ванне. Путем изменения этих технологических параметров можно получить покрытия с различными физико-механическими свойствами.

Необходимо отметить, что толщина гальванических осадков растёт

практически пропорционально длительности процесса электролиза. Увеличить скорость осаждения и значительно повысить эксплуатационные свойства покрытий можно путем периодического изменения направления (реверсирования) постоянного тока. Реверсирование тока позволяет ускорить процесс осаждения осадков в 1,5...2 раза и при этом получить малопористые покрытия с достаточно низким уровнем остаточных напряжений.

Технологический процесс нанесения гальванических покрытий должен обеспечивать получение осадков с необходимыми физико-механическими свойствами металла и высокой прочностью сцепления покрытия с основой. Достижение эксплуатационных свойств осадков основывается прежде всего на правильном выборе состава электролита и параметров режима электролиза, а также на высоком качестве предварительной подготовки поверхности исходной заготовки.

Технология электролитического осаждения покрытий представляет собой сложный многостадийный процесс, состоящий из следующих технологических операций: механическая обработка, выполняемая для устранения следов износа и придания восстанавливаемой поверхности правильной геометрической формы; промывка органическими растворителями и обезжиривание венской известью; сушка сухим сжатым воздухом; промывка холодной водой; сушка сухим сжатым воздухом; изоляция хлорвиниловой пленкой мест, на которые не предусмотрено осаждение металла; монтаж деталей на подвесные приспособления; декапирование (слабое протравливание); электролитическое осаждение покрытий; промывка холодной водой; промывка горячей водой; демонтаж с подвесных приспособлений; снятие изоляции; сушка; контроль и механическая обработка для получения правильной геометрической формы и необходимой точности изделий.

Наиболее широкое распространение в авторемонтном деле получил электрохимический способ получения износостойкого хромового покрытия. Хром отличается высокой твердостью и теплопроводностью, а также низким коэффициентом трения.

Электролитическое осаждение хрома на изношенные детали осуществляется из растворов хромовой кислоты с добавлением серной кислоты, являющейся источником посторонних анионов (катализаторов), которые инициируют выделение на катоде (детали) наноси-

мого металла. При осаждении хромовых покрытий анодом служит нерастворимая пластина, которую изготавливают из свинца или (лучше) из сплава свинца с 6% сурьмы, обладающего большой химической стойкостью. Для повышения прочности сцепления хромового покрытия с основным металлом осаждение хрома часто производят на подслое из меди. Прочность сцепления хромового осадка со сталью достаточно высока и превышает прочность хромового покрытия на разрыв, которая достигает 600 МПа.

Изменяя технологические параметры процесса электролитического осаждения хрома при неизменном составе электролита, можно получить три различных вида осадков хрома: блестящий, молочный и матовый (рис. 4.60), которые имеют различную структуру, твердость, пористость и остаточные напряжения.

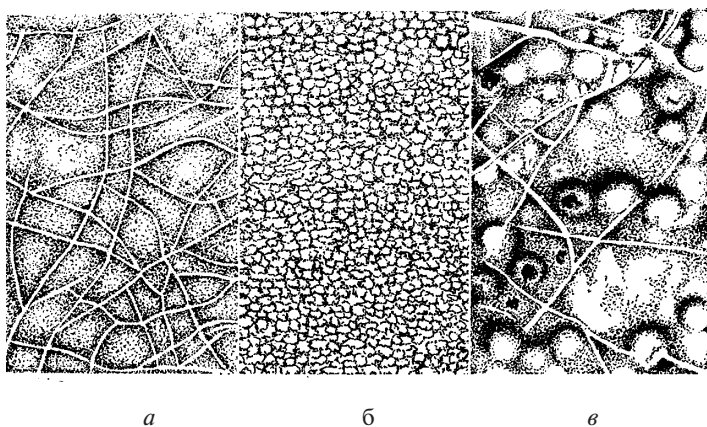


Рис. 4.60. Виды различных осадков хрома:  
*а* – блестящий; *б* – молочный; *в* – матовый

Блестящее хромовое покрытие, которое характеризуется высокой твердостью, прочностью и хрупкостью, получают при температуре электролита порядка 55°C и катодной плотности тока 55 А/дм<sup>2</sup>. Повышение твердости хромового осадка сопровождается ростом уровня остаточных напряжений растяжения, которые создают пористую структуру с характерной сеткой трещин. При увеличении температуры электролита происходит снижение пористости осадка, а сетка трещин становится более редкой. Гладкое хромовое покрытие неудовлетворительно смачивается

маслами и плохо прирабатывается. С целью повышения износостойкости хромового покрытия оно подвергается последующему анодному травлению. При анодном травлении, происходящем в электролите того же состава, растворение хрома происходит в основном по трещинам. В результате на поверхности гладкого хрома окончательно формируется сетка каналов, которая обладает большой маслостойкостью, предохраняющей поверхность трения от заедания.

Беспористый молочный хром по сравнению с блестящим имеет большую вязкость и меньшую твердость. Его получают при температуре электролита  $65^{\circ}\text{C}$  и плотности тока  $30 \text{ А/дм}^2$ . Молочное хромовое покрытие наносят преимущественно тонкими слоями на стальные закаленные детали, которые работают при малых давлениях. Его также применяют для повышения коррозионной стойкости изделий.

Матовое хромовое покрытие, обладающее высокой твердостью и хрупкостью, с успехом используется для восстановления поверхностей деталей, составляющих соединения с натягом. Матовый хром получают при температуре электролита порядка  $45^{\circ}\text{C}$  и плотности тока  $50 \text{ А/дм}^2$ .

Железнение (осталивание) в практике авторемонтного производства применяют в основном для восстановления размеров. Процесс железнения отличается высокой производительностью и технологической гибкостью. Выход железного осадка по току в 5...6 раз выше, чем при хромировании. При этом получают твердое покрытие толщиной более 1,5 мм, которое по износостойкости не уступает закаленной стали.

Железнение осуществляют с использованием растворимых (стальных) и нерастворимых (угольных) электродов. В авторемонтном деле для нанесения железного осадка используют преимущественно горячие хлористые электролиты. Температура электролита оказывает существенное влияние на твердость электролитического железа. Снижение температуры электролита приводит к увеличению твердости, но при этом также увеличивается хрупкость осадка.

Для всех гальванических покрытий характерны высокие остаточные напряжения растяжения. Из-за этого во многих случаях усталостная прочность и износостойкость гальванических покрытий оказываются недостаточными для восстановления тяжело нагруженных деталей, работающих в условиях абразивного и усталостного изнашивания.

Повысить усталостную прочность путем снижения уровня оста-

точных напряжений можно отпуском при температуре 500...650°С. Однако более эффективными технологическими мероприятиями, повышающими одновременно усталостную прочность, износостойкость и контактную выносливость гальванических покрытий, являются химико-термическая обработка (например, цементация) и поверхностное пластическое деформирование (например, алмазное выглаживание).

Цементация ускоряет протекание диффузионных процессов на границе покрытие – заготовка и изменяет в нужном направлении структуру, химический состав и напряженное состояние металла поверхностного слоя изделия. При цементации граница между покрытием и основой размывается вплоть до полного исчезновения, что способствует значительному повышению адгезионной прочности. При этом в поверхностном слое формируются остаточные напряжения сжатия, благоприятно влияющие на предел выносливости.

Для того чтобы при цементации получить высокое содержание карбидной фазы в диффузионном слое, необходимо на поверхность детали осадить не чистое железное покрытие, а, например, железохромистый осадок, в котором хром является активным карбидообразователем. Получение при науглероживании мелкодисперсных карбидов в поверхностном слое деталей приводит к повышению в 1,8...2,4 раза их износостойкости по сравнению с новыми изделиями.

Применение алмазного выглаживания для окончательной обработки гальванических покрытий позволяет повысить поверхностную твердость и получить высокий уровень остаточных напряжений сжатия. Сравнительный анализ технологий восстановления путем нанесения гальванических покрытий по двум вариантам (I – шлифование + хромирование + полирование; II – шлифование + хромирование + алмазное выглаживание) показал, что использование алмазного выглаживания в качестве финишной обработки позволяет повысить сопротивление усталости в 1,4...1,9 раза, износостойкость – в 1,5...2,5 раза, контактную выносливость – в 1,2...1,6 раза, а также обеспечить высокую прочность сцепления.

Технологической простотой обладает способ получения покрытий путем вневанного электролитического натирания (рис. 4.61). Его главным образом применяют для восстановления внутренних поверхностей базовых и корпусных деталей. Особенностью способа является

то, что электрохимическое осаждение покрытия происходит без погружения детали в наполненную электролитом ванну. Вместо ванны используют пропитанный электролитом фитиль, который изготавливается из мягких пористых материалов.

Для получения покрытия по центру восстанавливаемого отверстия устанавливается полый анод с фитилем, которому для получения равномерного покрытия задают вращательное и иногда возвратно-поступательное движение. В процессе электролиза через анод прокачивают электролит. В качестве катода выступает корпусная деталь. Фитиль, пропитанный электролитом, при обработке постоянно контактирует с изношенной поверхностью, обеспечивая электрохимическое наращивание покрытия. Для электролитического натирания могут быть использованы токарные, сверлильные станки или специализированное оборудование.

Процессы вневанного хромирования и железнения характеризуются высокими плотностями тока, большой производительностью и возможностью осаждения покрытий до 1,2 мм. Работоспособность таких покрытий выше работоспособности тех же поверхностей в новых изделиях.

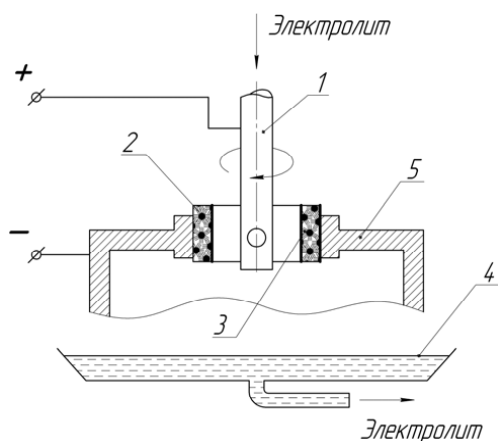


Рис. 4.61. Схема электролитического натирания посадочного места под подшипник в корпусной детали: 1 — шпиндель; 2 — фитиль; 3 — сетка; 4 — поддон с электролитом; 5 — восстанавливаемая деталь

В ремонтном производстве детали могут также восстанавливаться

химическим способом, например никелированием. Процесс никелирования осуществляется из раствора солей никеля и гипофосфитов контактным способом. В результате химической реакции, проходящей на поверхности восстанавливаемой детали, образуется никель-фосфорное покрытие толщиной 15...30 мкм. Это покрытие после термической обработки получает высокую твердость и антифрикционные свойства. Благодаря равномерности нанесения покрытий химическое никелирование наиболее эффективно при восстановлении деталей сложной формы.

Для реновации деталей могут также использоваться оксидирование и фосфатирование. Оксидирование стальных деталей производят в горячих щелочных растворах, содержащих окислители. В результате взаимодействия окислителей с металлом деталей на их поверхностях образуются оксидные пленки толщиной 0,6...1,5 мкм, которые имеют высокую прочность и надежно защищают металл от коррозии. Фосфатирование также предназначено для создания защитных плёнок, состоящих из сложных солей фосфора, марганца и железа. Образующиеся защитные плёнки, толщина которых не превышает 8,0...40 мкм, к тому же обладают высокой пористостью и износостойкостью.

#### *Контрольные вопросы*

1. Как получают гальванические покрытия на поверхностях восстанавливаемых деталей?
2. От каких факторов зависит качество гальванических покрытий?
3. Какие операции включает технология электролитического осаждения покрытий на поверхности восстанавливаемых деталей?
4. Какие виды осадков хрома вы знаете?
5. Какие преимущества и недостатки имеет железнение?
6. В чем заключается сущность способа получения гальванических покрытий путем электролитического натирания?

#### **4.5. Восстановление деталей синтетическими материалами**

В ремонтной практике синтетические пластмассы получили широкое распространение благодаря своей низкой стоимости, простоте технологии ремонта и малой трудоемкости процесса. Достоинствами пластмасс также являются низкая плотность, высокая удельная про-

чность, коррозионная стойкость и др.

При восстановлении деталей автомобилей используют различные пластмассы, которые можно разделить на две группы – термореактивные и термопластичные. Термореактивные пластмассы, первоначальные свойства которых после затвердевания вновь не восстанавливаются вследствие произошедших необратимых изменений свойств, применяют в качестве компенсатора износа, а также для заделки трещин, пробоин, задиров и др. Термопластичные пластмассы, которые при нагревании вновь пластифицируются (пластмассы переходят из твердого упругого состояния в мягкое, пластичное, пригодное для дальнейшей обработки), успешно используют при ремонте поверхностей деталей, составляющих как подвижные, так и неподвижные сопряжения.

Из термореактивных пластмасс наиболее широкое применение при восстановлении деталей нашли пластмассы на основе акриловых и эпоксидных смол. В большинстве случаев их используют в виде паст. Кроме связующих смол в них входят различные отвердители, пластификаторы и наполнители. Отвердители служат для превращения смолы в необратимое твердое вещество. В зависимости от температуры отверждения паст применяют те или иные виды отвердителей. Пластификаторы снижают хрупкость получаемой композиции, а порошкообразные, волокнистые и слоистые наполнители обуславливают эксплуатационные свойства пластмассы. Применяя в качестве наполнителя те или иные компоненты (стальной и чугунный порошок, алюминиевая пудра, стеклоткань, стекловолокно, графит, тальк и др.), можно изменять вязкость и пластичность пластмасс в зависимости от их назначения.

Затвердевшие пластмассы хорошо обрабатываются резанием, шлифуются и полируются. Они не растворяются в щелочах, воде, минеральных и растительных маслах, обладают высокой износостойкостью, особенно при введении в их состав антифрикционных добавок. Так, при добавлении в состав пластмасс порошка графита коэффициент трения снижается до 0,1. Пластмассы с такими добавками могут работать без смазки. Однако при введении графита ухудшается адгезионная прочность пластмассы с основой. Для повышения адгезионных свойств пластмассы восстановление изношенной поверхности осуществляют послойным нанесением состава. Сначала на восста-



навливаемой поверхности формируют первый слой пластмассы путем нанесения слоя акриловой пластмассы (акрилат или бутакрил) без наполнителя, обладающей максимальной адгезией. Раствор пластмассы наносят на поверхность свободной заливкой или вручную (шпателем или кистью). После этого наносят второй слой пластмассы, содержащий требуемое количество антифрикционного наполнителя. После отверждения пластмассы рабочая поверхность детали подвергается механической обработке.

Образовавшиеся в корпусных деталях трещины в основном заделывают композиционными полимерными материалами так называемой «холодной сваркой» (рис. 4.62). Композиционные полимерные материалы на основе эпоксидных, эпоксидно-акриловых (акрилаты), эпоксидно-диановых смол и др. позволяют не только успешно заменить пайку, сварку или наплавку, но и производить восстановление таких деталей, ремонт которых известными способами затруднен или невозможен.

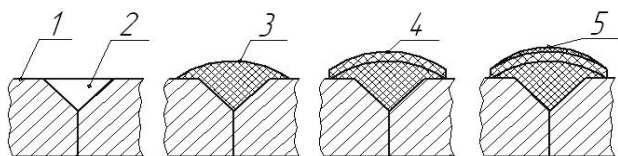


Рис. 4.62. Схемы заделки трещины в корпусной детали композиционными полимерными материалами: 1 – деталь; 2 – трещина; 3 – слой клеевой композиции; 4 – слой стеклоткани; 5 – верхний слой клеевой композиции

Сначала трещину засверливают по концам и разделяют, так же как и перед сваркой. В зоне вокруг трещины производится очистка и развитие поверхности песко- или дробеструйной обработкой. Затем подготовленную поверхность обезжиривают ацетоном или бензином. В засверленные отверстия вставляют асбестовые пробки и уплотняют их так, чтобы оставалось свободное пространство между поверхностями пробки и детали. Эпоксидную смесь укладывают шпателем в трещину в несколько слоев, уплотняя массу для удаления пузырьков воздуха. Общая толщина слоя должна быть 3...4 мм. Для того чтобы смесь не прилипала к шпателю, его смазывают глицерином. Сверху сформированного валика пластмассы, который должен перекрывать разделанные кромки трещины на 15...20 мм, накладывают кусок стеклоткани и для

уплотнения соединения накатывают его по краям роликом.

Восстановление изношенных внутренних поверхностей гильз гидроцилиндров осуществляют способом заливки полимерного материала в щелевой зазор. Сущность способа заключается в следующем. В восстанавливаемый металлический цилиндр, установленный на основании, концентрично вставляют центральный формирующий стержень. Этот стержень имеет несколько меньший диаметр, чем размер внутреннего диаметра цилиндра. На поверхность формирующего стержня предварительно наносят разделительный слой из дисульфида молибдена, который предотвращает адгезию полимера. Для надежного сцепления полимера с основным металлом производят нагрев конструкции. Полимерную композицию при помощи пистолета заливают в щелевой зазор и для равномерного распределения смеси конструкцию опять подогревают. Затем осуществляют подпрессовку цилиндра для удаления пузырьков воздуха из полимерного состава. После отверждения пластмассы конструкцию разбирают. Механическая обработка пластмассы в данной технологии восстановления сводится только к снятию фасок.

Из термопластических пластмасс наибольшее применение нашли полиамиды, капрон, фторопласты и эластомеры. Промышленность выпускает полиамиды в большинстве случаев в виде гранул. Покрытия из этого материала отличаются высокой твердостью, обладают хорошей адгезионной прочностью с металлами, достаточно высокой механической прочностью и износостойкостью, что позволяет успешно использовать их при восстановлении поверхностей деталей, работающих в условиях трения скольжения. Однако применение полиамидов при восстановлении деталей ограничивается следующими условиями: полиамидные покрытия можно наносить на сопрягаемые детали, изготовленные с точностью, соответствующей 8-му и более классам, и работающем при температуре не выше 80°C, скорости скольжения до 0,5 м/с и контактном давлении до 1,5 МПа.

Для восстановления изношенных поверхностей деталей, составляющих подвижные соединения, достаточно часто применяют напрессовку в пресс-форме или литье под давлением.

Сущность восстановления деталей напрессовкой (рис. 4.63) заключается в том, что изношенную деталь помещают в обогреваемую пресс-форму, в свободную полость которой (между деталью и внутрен-

ней поверхностью пресс-формы) засыпают гранулы термореактивной пластмассы. Под воздействием давления со стороны пресса и тепла от термоэлектрических нагревателей (тэнов) порошок пластмассы размягчается, заполняет пространство свободной полости и соединяется с поверхностью восстанавливаемой детали.

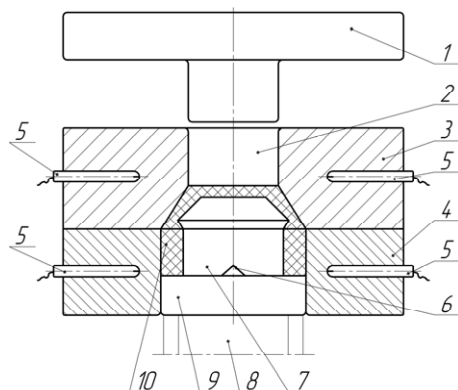


Рис. 4.63. Схема восстановления детали на прессовке: 1 – пуансон; 2 – загрузочная камера; 3, 4 – верхняя и нижняя части пресс-формы; 5 – термоэлектрические нагреватели; 6 – установочный выступ; 7 – восстанавливаемая деталь; 8 – выталкиватель; 9 – опорная плита; 10 – наращиваемый слой

Восстановление деталей литьем под давлением осуществляют термопластическими пластмассами (рис. 4.64). Деталь перед установкой в пресс-форму очищают от загрязнений и для лучшей адгезии обрабатывают дробью. Перед сборкой пресс-формы деталь нагревают до температуры  $85^{\circ}\text{C}$ , а пресс-форму – до  $60\text{--}65^{\circ}\text{C}$ . Затем пресс-форму устанавливают в литьевую машину, в цилиндре которой находится нагретый до температуры  $265^{\circ}\text{C}$  раствор полиамидного материала, который под давлением нагнетают в пресс-форму. Для выхода воздуха между частями пресс-формы предусмотрены щели шириной  $0,02\text{--}0,04$  мм. В отдельных случаях для удаления воздуха сверлят отверстия диаметром  $0,2\text{--}0,3$  мм. После того как раствор заполнит зазоры, пресс-форму с деталью медленно охлаждают до комнатной температуры и затем освобожденную из пресс-формы восстановленную деталь механически обрабатывают для получения необходимых

размеров. Детали, восстановленные полиамидами, не уступают по износостойкости новым изделиям, а интенсивность изнашивания сопряженных с ними деталей снижается до четырех раз.

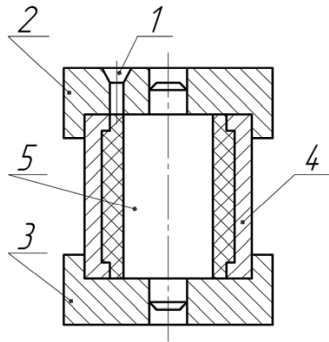


Рис. 4.64. Схема восстановления детали литьем под давлением: 1 – литник; 2, 3 – верхняя и нижняя части пресс-формы; 4 – цилиндрическая боковая часть пресс-формы; 5 – восстанавливаемая деталь

Для восстановления посадочных поверхностей, соединяемых с натягом, достаточно часто используют эластомеры. Они обладают высокой адгезией и хорошими эластическими свойствами в широком диапазоне температур. Раствор эластомера получают растворением в ацетоне мелко нарезанных частиц сухого полимерного материала, выпускаемого в виде вальцованных листов. После обезжиривания бензином или ацетоном на поверхность восстанавливаемой детали наносят слой эластомера. Если необходимо нанести толстый слой пластмассы, то это делают способом наслоения, т. е. последовательным нанесением тонких пленок с выдержкой до 20 минут между нанесением слоев. При этом каждый последующий слой хорошо соединяется с ранее нанесенным. Приготовленный раствор эластомера летуч и токсичен, поэтому его следует хранить в герметически закрытой таре в огнебезопасном месте при температуре 15...20°С.

Центрбежную заливку эластомера рекомендуется применять для восстановления посадочных диаметров внутренних колец подшипников, цилиндров, втулок и др. Этот способ позволяет быстро наносить равномерную пленку с рассчитанной заранее толщиной слоя.

Центрбежную заливку обычно выполняют на токарном станке

при помощи специального разъемного приспособления, в которое закладывают восстанавливаемую деталь (рис. 4.65).

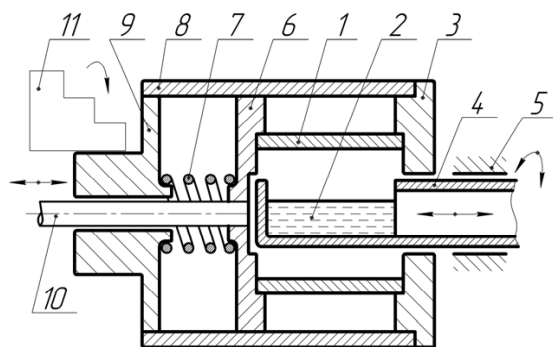


Рис. 4.65. Схема центробежной заливки эластомера: 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – раствор эластомера; 3 – наружный установочный диск; 4 – дозирующая трубка; 5 – направляющие; 6 – нажимной диск; 7 – пружина; 8 – защитный кожух; 9 – основание корпуса; 10 – шток для отвода нажимного диска, 11 – кулачки патрона токарного станка

По достижении установившейся частоты вращения шпинделя 1000...1500 об/мин дозирующую трубку поворачивают на 180°, и раствор эластомера попадает во внутреннюю полость восстанавливаемой детали. При вращении приспособления возникает центробежная сила, которая прижимает жидкий эластомер к внутренней поверхности детали, в результате чего эта поверхность покрывается равномерным слоем. После 3...4 минут вращения главный привод станка выключают и деталь с нанесенной пленкой вынимают из приспособления. Для получения максимальных прочностных свойств покрытия восстанавливаемую деталь после выдержки на воздухе в течение 20 минут дополнительно подвергают нагреву в течение часа при температуре 100...120°C. Процесс нагрева производится непосредственно перед запрессовкой деталей, составляющих соединение с натягом. Покрытия из эластомеров существенно повышают плотность стыка в прессовых посадках, вследствие чего значительно снижается интенсивность фреттинг-коррозии.

Повысить плотность стыка соединений с натягом можно также анаэробными полимерными материалами, которые быстро отвердевают с образованием твердого полимерного слоя в узких зазорах при

условии отсутствия контакта с кислородом воздуха. Благодаря высокой проникающей способности анаэробные материалы (они плотно заполняют трещины, поры и другие дефекты) позволяют восстановить прочность резьбовых соединений шпилек с корпусной деталью при износе и частичном повреждении резьбы.

Основой анаэробных составов являются способные к полимеризации соединения акрилового ряда. Анаэробные материалы после отверждения обладают высокой термической и химической стойкостью. Они обеспечивают работоспособность узлов и деталей при эксплуатации их в контакте с органическими растворителями и агрессивными средами в широком интервале температур и давлений.

При восстановлении посадочных мест деталей, соединяемых с натягом, с успехом применяется способ клеивания стальной ленты. Он эффективен в том случае, когда необходимо обеспечить посадку внутреннего кольца подшипника на посадочную шейку вала, имеющую ремонтный размер. Для обеспечения необходимого натяга толщину металлической ленты подбирают с таким расчетом, чтобы после приклеивания оставался припуск на механическую обработку. Длина ленты должна быть достаточной, чтобы после её приклеивания получился зазор в стыке ленты порядка 0,5...1 мм. По ширине лента не должна превышать длины посадочной поверхности внутреннего кольца. Перед приклеиванием посадочные поверхности внутреннего кольца и ленты тщательно обрабатывают шкуркой, создавая таким образом необходимую шероховатость и очищая поверхности от продуктов коррозии. Затем поверхности обезжиривают сначала бензином, а потом ацетоном. После этого на подготовленные поверхности ленты и кольца волосяной кистью наносят слой эластомера и просушивают на воздухе. Второй слой наносят не ранее чем через час и опять сушат такое же время. После сушки выполняют склеивание. Ленту накладывают на посадочную поверхность кольца подшипника. Внутри кольца вставляют предварительно сжатую разрезную втулку, которая, расширяясь, плотно прижимает ленту к внутренней поверхности кольца, создавая давление в контакте примерно 0,5 МПа. Далее собранную конструкцию помещают в термостат и производят сушку при температуре 120°C в течение часа, после чего деталь охлаждают до комнатной температуры. Освободив кольцо от разрезной втулки, его

растачивают под размер посадочной поверхности вала, обеспечивая таким образом необходимую величину натяга при запрессовке.

Применение эпоксидного клея при проведении ремонтных работ позволяет существенно упростить технологию сборки узлов. Достаточно часто при запрессовке втулки в корпусную деталь происходит ее деформация, которая возникает вследствие погрешности обработки ее наружной поверхности. Появляющееся при этом искажение внутренней поверхности втулки устраняют развертыванием и окончательной доводкой шабрением. Установка на эпоксидном клее втулки с несколько заниженным наружным диаметром позволяет исключить эту трудоемкую дополнительную обработку и обеспечить требуемую соосность собираемых деталей. Однако в этом случае монтаж втулки желательнее производить в сборе с сопряженным валом.

При запрессовке подшипника качения в корпусе машины также достаточно часто происходит деформация гнезда корпуса, в которое устанавливается подшипник. Поэтому при замене изношенного подшипника на новый сопрягаемые поверхности уже не могут обеспечить требуемого характера соединения. Исправить ситуацию можно опять же при помощи клея. Для этого в смазанную эпоксидным клеем посадочную поверхность гнезда корпусной детали осторожно вставляют подшипник качения, находящийся опять же в сборе с валом (рис. 4.66).

Приклеивание тонкостенных втулок на посадочные поверхности деталей – один из способов восстановления соединений с натягом изношенных посадочных поверхностей валов и внутренних колец подшипников. Для того чтобы восстановить требуемое сопряжение, подшипник растачивают до удаления следов износа, а на посадочную поверхность вала наклеивают тонкостенную втулку (рис. 4.67), толщина которой после последующей механической обработки должна быть не менее 2 мм. После того как клей полностью высохнет, наружную поверхность втулки протачивают для получения требуемого размера, обеспечивающего необходимую величину натяга в сопряжении после запрессовки деталей.

Применение эпоксидного клея позволяет устанавливать на изношенные поверхности различные накладки толщиной 2...3 мм практически из любого материала. Для приклеивания накладок

применяют в основном композиции, состоящие из эпоксидной смолы, дибутилфталата, полиэтиленполиамиона, портландцемента и др. Заменителем эпоксидного клея при установке, например, текстолитовых накладок может служить карбинольный клей. В состав клея входят карбинольный сироп, перекись бензоила и портландцемент. Этот клей обладает хорошей стойкостью по отношению к минеральным маслам, керосину, бензину, не окисляется кислородом воздуха и не растворяется в воде. Клей полностью высыхает при температуре 15...30°C за 25...30 часов. При нагревании соединения до 60°C срок отверждения сокращается до 8 часов.

При эксплуатации автомобиля возникает необходимость замены фрикционных накладок на тормозных колодках и ведомом диске сцепления. Фрикционные накладки приходят в негодность из-за большого износа, образования трещин и неровностей на их поверхностях. При ремонте изношенные накладки срезают или снимают после расклеивания. Посадочные поверхности тормозных колодок подвергают тщательной мойке и обезжириванию. После чего на них приклеивают эпоксидным клеем новые фрикционные накладки, используя при этом специальные прижимные приспособления. Отверждение клея может проходить как на открытом воздухе, так и в термостате.

*Преимущества восстановления синтетическими материалами:*

- процесс нанесения полимерных материалов не требует сложного оборудования и высокой квалификации рабочих;
- возможность проведения ремонта без разборки узлов и агрегатов;
- возможность восстановления деталей без проведения механической обработки;
- возможность многократного восстановления без дополнительного снятия слоя основного металла.

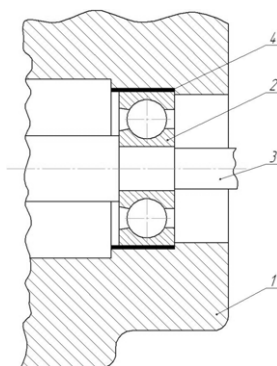


Рис. 4.66. Схема посадки подшипника качения в гнездо корпусной детали: 1 – корпусная деталь; 2 – подшипник; 3 – вал; 4 – слой клеевой композиции



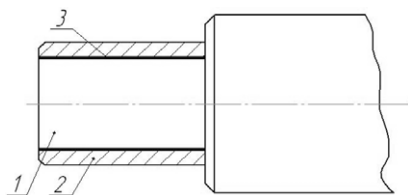


Рис. 4.67. Схема установки тонкостенной втулки на цапфе вала:  
1 — цапфа; 2 — тонкостенная втулка;  
3 — слой клеевой композиции

*Недостатком восстановления синтетическими материалами является невозможность использования пластмасс в изделиях, работающих при повышенных температурах.*

#### *Контрольные вопросы*

1. Почему в ремонтном производстве синтетические материалы получают все большее применение?
2. Какие два вида пластмасс вы знаете? Чем они принципиально отличаются?
3. Почему при устранении трещины в чугунном корпусе путем заклеивания эпоксидной смолой в нее добавляют чугунный или железный порошок?
4. Как можно повысить антифрикционные свойства пластмассовых покрытий?
5. В чем заключается сущность восстановления внутренней поверхности гильз способом заливки полимерного материала?
6. В каком виде в ремонтное производство поставляются термопласты и как они наносятся на изношенные детали?

### **4.6. Восстановление деталей заливкой жидким металлом**

При восстановлении сильно изношенных крупногабаритных деталей (гильзы, рабочие цилиндры, опорные катки, звенья гусениц ведущих колес гусеничных тракторов и др.) используют заливку жидким металлом. Этот способ дает высокую производительность и качество восстановленных изделий. Присадочный металл расплавляют либо в плавильных печах и заливают из тигля с помощью специального разливочного устройства, либо токами высокой частоты и центробежным способом заливают полые детали. Для получения высокой прочности сцепления заливаемого металла с основой восстанавливаемую поверхность детали подвергают специальной обработке: предварительно оплавлению с помощью мощной угольной дуги, газовых горелок или индукционного нагрева; нарезке на поверхности рваной резьбы;

химическому травлению и др. Присадочный металл по химическому составу выбирают идентичным составу металла детали. При этом температура плавления у него должна быть ниже, чем у основы.

При восстановлении внутренней поверхности полых деталей применяют технологию центробежной заливки с нагревом ТВЧ (рис. 4.68), которая включает следующие операции: предварительная механическая и химическая обработка восстанавливаемой поверхности; изготовление асбестовых прокладок и крышек для закрытия торцов; введение дозированного количества шихты в деталь, чтобы получить покрытие заданной толщины; закрытие внутренней полости детали крышками с асбестовыми прокладками и установка заготовки в центрах токарного станка или другого вращающегося приспособления; установка индуктора и включение тока; включение после расплавления шихты механизма вращения детали; принудительное охлаждение сжатым воздухом по истечении 3...5 минут вращения детали; выключение механизма вращения после того, как металл остынет до температуры порядка 700°С; снятие детали со станка и окончательное охлаждение до комнатной температуры; снятие или отрезка крышек; чистовое растачивание внутренней поверхности; окончательная подрезка торцов изделия.

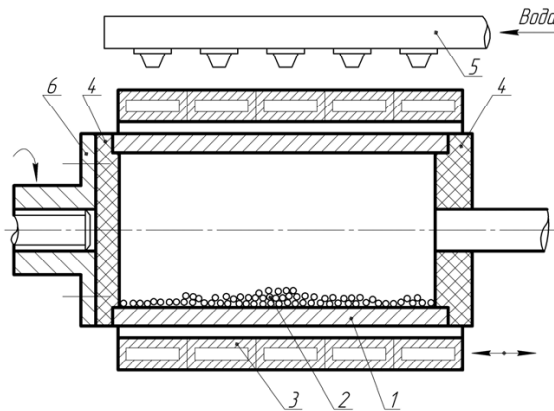


Рис. 4.68. Схема центробежной заливки с нагревом ТВЧ:  
1 – восстанавливаемая деталь; 2 – шихта; 3 – индуктор; 4 – асбестовая уплотняющая прокладка; 5 – система водяного охлаждения;  
6 – переходная втулка привода вращения

Для восстановления опорных катков применяется достаточно прогрессивный способ заливки жидким металлом. Суть его заключается в том, что жидкий металл заливают на изношенную поверхность детали, которую нагревают ТВЧ до температуры 1100...1150°С. При этом достигается прочное молекулярное сцепление заливаемого присадочного металла с нагретым металлом восстанавливаемой поверхности. Избыточный металл отводится по специальным спускным устройствам. Перед заливкой металла восстанавливаемую поверхность зачищают до металлического блеска и подвергают химическому травлению. После заливки деталь окончательно механически обрабатывают для получения требуемого размера.

#### *Контрольные вопросы*

1. В каком случае обычно используют восстановление деталей заливкой жидким металлом?
2. Как расплавляют присадочный металл?
3. В чем заключается сущность способа восстановления деталей заливкой жидким металлом?
4. Что представляет собой технология восстановления внутренней поверхности цилиндрических деталей способом центробежной заливки металла?
5. Как обеспечить прочное сцепление заливаемого присадочного металла с основой?

#### **4.7. Восстановление деталей ремонтными размерами**

Ухудшение функциональных показателей многих автомобильных узлов и агрегатов в основном обусловлено изменением первоначальной посадки сопряженных деталей. В большинстве случаев работоспособность посадки возобновляется способом восстановления под индивидуальный размер, при котором конструктивно сложную деталь сопряжения механически обрабатывают до выведения следов износа и получения правильной геометрической формы. Вторую (сопрягаемую с ней) деталь наращивают и при механической обработке подгоняют к размеру первой, позволяющему обеспечить необходимую посадку. Этот способ не обеспечивает взаимозаменяемости деталей и, как правило, используется в условиях единичного ремонта.

Более прогрессивным и дешевым является способ восстановления деталей ремонтными размерами. Сущность способа заключается в том, что одну из изношенных деталей, более сложную и дорогую, подвергают механической обработке до заранее установленного (ремонтного) размера, а другую заменяют изготовленной под этот же размер. Этот способ обеспечивает взаимозаменяемость деталей в пределах данного ремонтного размера.

Промышленность выпускает поршни, поршневые кольца, вкладыши шатунных и коренных подшипников коленчатого вала и другие детали нескольких ремонтных размеров. В авторемонтном производстве в соответствии с этими размерами восстанавливают сопряженные с ними детали. Количество ремонтных размеров устанавливается заводом-изготовителем в зависимости от глубины упрочненного слоя рабочих поверхностей деталей. При этом принимается во внимание снижение при ремонте жесткости и запаса прочности деталей.

В автомобильной промышленности упрочнение поверхностей деталей в основном проводится химико-термической обработкой. При этом поверхностный слой упрочняется в среднем на 1,2 мм. Это позволяет назначать 3...4 ремонтных размера. Величина ремонтного размера зависит от величины и характера износа деталей за межремонтный срок службы автомобиля, а также от припуска на механическую обработку. Технологический припуск с целью увеличения срока службы детали следует принимать минимальным. Для чистового точения и растачивания его принимают равным 0,05...0,1 мм, а при шлифовании – 0,03...0,05 мм. Следует отметить, что припуск меньше указанных значений назначать не рекомендуется, потому что при каждом виде обработки существует некоторая минимальная глубина резания, при которой создаются условия для нормального резания и, следовательно, для получения требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности. При обработке с глубиной резания меньше указанных пределов не создаются условия для нормального образования стружки. В результате получают «драную» поверхность обрабатываемой детали.

Увеличение количества ремонтных размеров и продление тем самым срока службы агрегатов возможны при увеличении глубины упрочненного слоя деталей. Однако это сопряжено с существенным усложнением и удорожанием технологии химико-термической обра-

ботки, что делает данное мероприятие экономически невыгодным. Хотя для двигателей автомобилей ЗИЛ ранних выпусков количество ремонтных размеров было равно 7. КамАЗ вообще отказался от ремонтных размеров цилиндропоршневой группы, считая, что замена изношенной съемной гильзы цилиндра и производство поршней и гильз с постоянными размерами экономически более выгодно, чем производство поршней и колец с разными ремонтными размерами.

Величину первого ремонтного размера можно определить по формулам:

для наружных цилиндрических поверхностей (валов)

$$d_p = d_H - 2(u_{\max} + t),$$

для внутренних поверхностей (отверстий)

$$D_p = D_H + 2(u_{\max} + t),$$

где  $d_p$  и  $D_p$  – ремонтные размеры вала и отверстия соответственно;  $d_H$  и  $D_H$  – номинальные размеры вала и отверстия по чертежу;  $u_{\max}$  – величина максимального износа детали на сторону;  $t$  – глубина резания при механической обработке.

Следует отметить, что при измерении детали после асимметричного изнашивания достаточно трудно определить величину максимального износа детали на сторону. Выходом из сложившегося положения является использование коэффициента неравномерности износа  $\beta$ , который определяется отношением максимального износа  $u_{\max}$  детали на сторону к величине общего износа  $u$  на диаметр детали. Зная величину коэффициента неравномерности износа, можно определить значение максимального износа детали на сторону:

$$u_{\max} = \beta u,$$

где  $\beta = 0,5 \dots 1,0$  – коэффициент неравномерности износа;  $u$  – общий износ детали на диаметр детали.

Величину  $y = 2 \times (\beta u + t)$  называют межремонтным интервалом, по которому определяют количество ремонтных размеров для валов и отверстий соответственно:  $n_B = (d_H - d_{\min})/y$ ;  $n_0 = (D_{\max} - D_H)/y$ .

#### *Контрольные вопросы*

1. От чего зависит число ремонтных размеров детали?
2. В каких пределах должен быть припуск на используемые при восстановлении автомобильных деталей чистовые точение и шлифование?

3. Почему получают «драную» поверхность обрабатываемой детали?
4. На какую глубину упрочняется поверхностный слой автомобильных деталей химико-термической обработкой?
5. Какие детали автомобиля имеют стандартные ремонтные размеры?
6. Какие можно привести примеры использования дополнительных ремонтных деталей при ремонте автомобилей?

#### **4.8. Восстановление деталей дополнительными ремонтными деталями**

Дополнительные ремонтные детали (втулки, гильзы, кольца, диски, пластины, резьбовые вставки и др.) служат для компенсации износа и других повреждений рабочих поверхностей деталей. Например, при износе рабочей поверхности в корпусной детали отверстие расверливают под больший размер и вставляют дополнительную ремонтную деталь – втулку или кольцо (рис. 4.69) с заданным номинальным размером внутренней поверхности. Толщина дополнительной ремонтной детали определяется из условия прочности и намного превышает величину износа восстанавливаемой поверхности. Соединение ремонтной детали с изделием можно производить путем запрессовки с соответствующим натягом. Для успешного выполнения запрессовки рекомендуется предварительно обеспечить соосность сопрягаемых деталей при помощи специальных приспособлений и осуществлять подогрев охватывающей и охлаждение охватываемой детали. При повышенных требованиях к точности сопряженных деталей после запрессовки требуется дополнительная механическая обработка внутренней поверхности дополнительной ремонтной втулки.

Необходимо отметить, что дополнительную ремонтную деталь, как правило, изготавливают из того же материала, что и основную. Однако если дополнительной детали требуется повышенная износостойкость, то материал выбирают более прочный, более высокого качества, чем материал основной детали.

С целью обеспечения надежности соединения дополнительной детали с основной в стыке по торцу засверливают отверстия и устанавливают в них штифты, резьбовые стопоры или проводят приварку соединенных деталей в нескольких точках. После этого штифты и точки сварки срезают заподлицо с плоскостью основной детали.

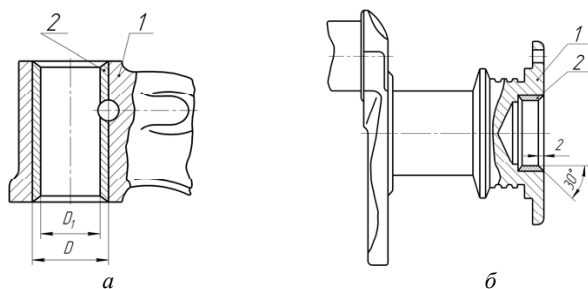


Рис. 4.69. Схемы восстановления деталей дополнительными ремонтными деталями (*a* – втулкой; *б* – кольцом): 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – дополнительная ремонтная деталь

При срыве резьбы в корпусной детали применяют дополнительную деталь – свертыш, который соединяют с основной деталью при помощи резьбы. Для этого отверстие основной детали рассверливают под увеличенный размер резьбы, нарезают резьбу и вкручивают свертыш (рис. 4.70). В нем высверливают отверстие под номинальный размер резьбы шпильки, нарезают резьбу и вворачивают шпильку. Применение прогрессивных ремонтных технологий и массово изготавливаемых дополнительных ремонтных деталей позволяет существенным образом увеличить долговечность восстановленных соединений. Например, в настоящее время все большее распространение получает ремонт резьбовых соединений при помощи винтовых спиралей «Хейли-Койл», которые изготавливают из легированной пружинной стали. Эти спирали вкручивают до упора за имеющийся у них «усик» в предварительно расширенное резьбовое отверстие. Выступающую часть спирали надпиливают и отламывают, после чего в восстановленное резьбовое отверстие вворачивают сопряженную деталь.

Способом восстановления дополнительными ремонтными деталями ремонтируют (в основном запрессовкой втулок в гнезда подшипников) коробки передач, задние мосты, гильзы блока цилиндров двигателей.

Для ремонта гильз блока цилиндров широко применяют способ восстановления сменным зеркалом (рис. 4.71). Этот способ достаточно прост в реализации при наличии прессы и металлорежущего станка.

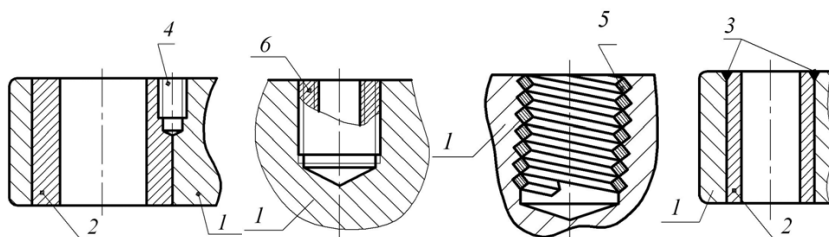


Рис. 4.70. Примеры установки дополнительных ремонтных деталей:  
 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – втулки; 3 – точки сварки; 4 – резьбовой штифт; 5 – спираль «Хейли-Койл»; 6 – ввертыш

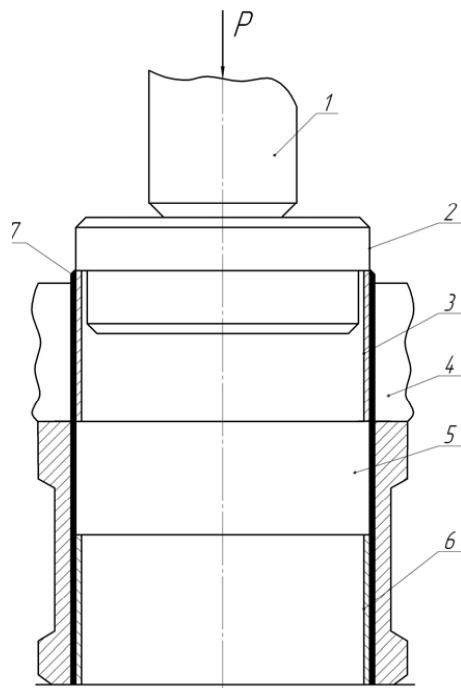


Рис. 4.71. Схема запрессовки пластины в гильзу цилиндра: 1 – шток пресса; 2 – ступенчатый пуансон; 3 – свернутая пластина; 4 – матрица; 5 – восстанавливаемая деталь; 6 – первый пояс пластины



Сущность его в том, что в предварительно расточенное отверстие гильзы запрессовывается тонкая изогнутая пластина (сменное зеркало). Благодаря высоким упругим свойствам и небольшой толщине пластина плотно прилегает к стенке отверстия, принимая его форму. Являясь упругой оболочкой, пластина все силовые нагрузки передает стенкам гильзы и прочно в ней удерживается.

Толщина пластины выбирается несколько больше максимально допустимого износа отверстия гильзы.

При изготовлении пластин материалом служит стальная, холоднокатаная, термообработанная, полированная лента, резка которой на мерные фрагменты производится при помощи гильотинных ножиц. Отрезанная пластина вставляется в формирующую матрицу, которая придает ей цилиндрическую форму. Затем матрица с пластиной concentрично помещается над отверстием гильзы, установленной на прессе. Под пуансон ставится ступенчатая оправка, с помощью которой изогнутая пластина запрессовывается в отверстие. Далее за первым поясом запрессовываются следующие. Затем производится механическая обработка пластин в сборе.

Технология повторного восстановления отверстий в гильзах цилиндров также является достаточно простой. Сменное зеркало заостренной оправкой раскрывается по вертикальному стыку и удаляется. Вместо него устанавливается новое зеркало.

#### *Контрольные вопросы*

1. Какие наиболее распространенные дополнительные ремонтные детали вы знаете?
2. Какие дополнительные ремонтные детали используют при восстановлении резьбового соединения в корпусной детали?
3. Как производят закрепление дополнительных ремонтных деталей после их установки?
4. В чем заключается сущность способа восстановления гильз блока цилиндров сменным зеркалом?
5. Какие вы можете привести примеры использования дополнительных ремонтных деталей при ремонте автомобилей?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аскинази, Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электро-механической обработкой / Б.М. Аскинази. – М. : Машиностроение, 1989. – 200 с.
2. Болбас, М.М. Основы эксплуатации и ремонта автомобилей : учеб. пособие / М.М. Болбас. – Минск : Высш. шк., 1985. – 284 с.
3. Вагнер, В.Ф. Основы триботехники. В 2 ч. Ч. 1. Процессы в трибо-механических системах : учеб. пособие / В.Ф. Вагнер, Б.И. Ковальский, В.Ф. Терентьев. – Красноярск : КГТУ, 1998. – 212 с.
4. Виноградов, В.М. Технологические процессы ремонта автомобилей : учеб. пособие / В.М. Виноградов. – М. : Академия, 2007. – 384 с.
5. Волжин, Г.Н. Восстановление изношенных деталей строительных машин / Г.Н. Волжин, С.Е. Ровках, В.Г. Вердников. – М. : Изд-во литер. по строительству, 1968. – 240 с.
6. Вольперт, Г.Д. Покрытия распыленным металлом / Г.Д. Вольперт. – М. : Изд-во литер. по строительным материалам, 1957. – 265 с.
7. Восстановление деталей машин : справочник / под ред. В.П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.
8. Гаврилюк, В.С. Экологический потенциал реновационного производства в концепции устойчивого развития / В.С. Гаврилюк, Э.Л. Мельников, А.О. Бояркин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – № 4. – С. 2–5.
9. Грохольский, Н.Ф. Восстановление деталей машин и механизмов сваркой и наплавкой / Н.Ф. Грохольский. – М. ; Л.: Машиностроение, 1966. – 272 с.
10. Данилевский, В.В. Справочник молодого машиностроителя / В.В. Данилевский. – М. : Высш. шк., 1973. – 648 с.
11. Зайдес, С.А. Упрочнение, восстановление, правка валов : учеб. пособие / С.А. Зайдес, Г.В. Мураткин. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2005. – 336 с.
12. Зильберглейт, В.А. Технология обработки шлицев / В.А. Зильберглейт. – М. : НИИМАШ, 1973. – 80 с.
13. Знаменский, С. Идеальный шрот / С. Знаменский // Авторевю. – 2006. – № 18. – С 10–12.
14. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий / О.Ф. Клюев [и др.] // Сварщик. – 2005. – № 3. – С. 24–27.

15. Корсаков, Г.Э. Повышение долговечности машин технологическими методами / Г.Э. Корсаков, В.С. Таурит, Г.Д. Василюк. – Киев : Техника, 1986. – 158 с.
16. Кременский, И.Г. Восстановление деталей пластическим деформированием: практика и особенности технологии / И.Г. Кременский // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2006. – № 3. – С. 43–46.
17. Леонтьев, Л.Б. Принципы проектирования технологии восстановления и упрочнения деталей / Л.Б. Леонтьев // Металлообработка. – 2004. – № 2. – С. 20–25.
18. Леонтьев, Л.Б. Методика расчета толщины покрытия и припусков на механическую обработку при восстановлении деталей / Л.Б. Леонтьев // Металлообработка. – 2004. – № 1. – С. 21–23.
19. Малкин, В.С. Основы эксплуатации и ремонта автомобилей : учеб. пособие / В.С. Малкин, Ю.С. Бугаков. – Ростов н/Д : Феникс, 2007. – 431 с.
20. Материаловедение. Технология конструкционных материалов : в 2 кн. / В.Ф. Карпенков [и др.]. – М. : КолосС, 2006. – Кн. 2. – 311 с.
21. Матлин, А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Матлин. – Л. : Машиностроение, 1970. – 320 с.
22. Мельников, Э.Л. Словарь терминов по специальности «Реновация объектов и средств материального производства» / Э.Л. Мельников // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2005. – № 9–11 ; 2006. – № 2, 4, 6, 8, 10.
23. Молодык, Н.В. Восстановление деталей машин : справочник / Н.В. Молодык, А.С. Зенкин. – М. : Машиностроение, 1989. – 479 с.
24. Новый политехнический словарь / гл. ред. А.Ю. Ишлинский [и др.]. – М. : Большая Российская энциклопедия, 2000. – 671 с.
25. Нормирование точности в машиностроении : учебник / под ред. Ю.М. Соломенцева. – М. : Академия, 2001. – 335 с.
26. Папшев, Д.Д. Технологические методы повышения надежности и долговечности деталей машин поверхностным упрочнением : учеб. пособие / Д.Д. Папшев. – Куйбышев : КПТИ, 1983. – 81 с.

27. Пашков, А.П. Ремонт: сущность, значимость, перспектива / А.П. Пашков // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2006. – № 6. – С. 2–6.
28. Петросов, В.В. Ремонт автомобилей и двигателей: учебник / В.В. Петросов. – М.: Академия, 2005. – 224 с.
29. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин – М.: Машиностроение, 1988. – 239 с.
30. Технология авторемонтного производства: учебник / под ред. К.Т. Кошкина. – М.: Транспорт, 1969. – 568 с.
31. Титунин, Б.А. Ремонт автомобилей КамАЗ: учеб. пособие / Б.А. Титунин, Н.Г. Старостин, В.М. Мушниченко. – Л.: Агропромиздат, 1987. – Кн. 1. – 288 с.
32. Трение, изнашивание и смазка: справочник в 2 кн. / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
33. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки; пер. В.Н. Попова. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
34. Хворостухин, Л.А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А. Хворостухин. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.
35. Хромов, В.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин термупруго-пластическим деформированием / В.Н. Хромов, И.К. Сенченков. – Орел: Изд-во ОГСХА, 1999. – 221 с.
36. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.

Учебное издание

*Мураткин Геннадий Викторович*

*Малкин Владимир Сергеевич*

*Доронкин Владимир Геннадьевич*

ОСНОВЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ  
И РЕМОНТ АВТОМОБИЛЕЙ

Учебное пособие

В двух частях

Часть 1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ

Редактор *Т.Д. Савенкова*

Технический редактор *З.М. Малявина*

Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 12.09.2012. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 14,35.

Тираж 300 экз. (1-й з-д 1-100). Заказ № 1-55-11.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ (Г.В. Мураткин).....	3
1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ (Г.В. Мураткин).....	8
1.1. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей путем управления несущей способностью поверхностного слоя.....	8
1.2. Точность деталей.....	10
1.3. Волнистость поверхности деталей.....	19
1.4. Шероховатость поверхности деталей.....	20
1.5. Основные параметры качества материала поверхностного слоя деталей.....	27
1.6. Технологические остаточные деформации деталей.....	40
2. ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ (Г.В. Мураткин).....	46
2.1. Основные понятия, термины и показатели.....	46
2.2. Характеристики основных видов изнашивания.....	48
3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ (Г.В. Мураткин).....	56
3.1. Влияние параметров поверхностного слоя на износостойкость.....	56
3.2. Влияние параметров поверхностного слоя на усталостную прочность.....	67
3.3. Влияние параметров поверхностного слоя на контактную жёсткость.....	75
3.4. Влияние параметров поверхностного слоя на статическую прочность соединений с натягом и на фреттингстойкость контактных поверхностей.....	79
3.5. Влияние параметров поверхностного слоя на коррозионную стойкость.....	87
3.6. Влияние параметров поверхностного слоя деталей на интенсивность деформационного изнашивания.....	95
3.7. Способы снижения интенсивности изнашивания деталей и узлов автомобиля.....	98

3.8. Установление предельно допустимых износов в узлах и деталях машин.....	111
<b>4. СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ</b>	
ДЕТАЛЕЙ ( <i>Г.В. Мураткин</i> ).....	117
4.1. Способы восстановления деталей пластическим деформированием.....	118
4.2. Восстановление деталей сваркой и наплавкой.....	143
4.3. Восстановление деталей напылением.....	185
4.4. Восстановление деталей путем нанесения гальванических и химических покрытий.....	216
4.5. Восстановление деталей синтетическими материалами.....	223
4.6. Восстановление деталей заливкой жидким металлом.....	233
4.7. Восстановление деталей ремонтными размерами.....	235
4.8. Восстановление деталей дополнительными ремонтными деталями.....	238
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>242</b>

Учебное издание

*Мураткин Геннадий Викторович*

*Малкин Владимир Сергеевич*

*Доронкин Владимир Геннадьевич*

ОСНОВЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ  
И РЕМОНТ АВТОМОБИЛЕЙ

Учебное пособие

В двух частях

Часть 1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ

Редактор *Т.Д. Савенкова*

Технический редактор *З.М. Малявина*

Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 12.09.2012. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 14,35.

Тираж 300 экз. (1-й з-д 1-100). Заказ № 1-55-11.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14



