

**Тамаркин М.А., Лебедев В.А., Прокопец Г.А., Анкудимов Ю.П., Давыдова  
И.В., Прокопец А.А., Тихонов А.А.**

**«Технологическое обеспечение качества поверхности и  
эксплуатационных свойств деталей машин»**

**Учебное пособие**

Авторы:

Тамаркин М.А., Лебедев В.А., Прокопец Г.А., Анкудимов Ю.П., Давыдова И.В.,  
Прокопец А.А., Тихонов А.А.

Технологическое обеспечение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин: учеб, пособие/ М.А.Тамаркин и др. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. - с.

В учебном пособии рассмотрен комплекс вопросов связанный с обеспечением качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин на стадии технологической подготовки производства. Показана роль и значение технологической подготовки производства в обеспечении жизненного цикла изделий. Дана характеристика эксплуатационных свойств деталей машин, раскрыта физическая сущность процессов и явлений, протекающих в поверхностном слое деталей в процессе их эксплуатации. Раскрыта взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с качеством поверхности. Представлена физико-технологическая сущность способов формирования качества поверхностного слоя и методы их реализации. Систематизированы подходы аналитической оценки эксплуатационных свойств деталей и показаны пути автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства

Предлагаемое пособие подготовлено в соответствии с образовательными программами по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и предназначено для бакалавров и магистров вышеуказанного направления, а также для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами технологической подготовки машиностроительных и ремонтно-восстановительных производств.

Рецензенты:      д.т.н., проф . ДГТУ      М.Е.Попов  
                         д.т.н. проф. ЮФУ      В.И.Бутенко

## Оглавление

### Введение

#### Глава 1. Жизненный цикл изделий машиностроения.

1.1 Технологическая составляющая жизненного цикла изделия

1.2. Сущность реновационного этапа в обеспечении жизненного цикла изделий

1.3 Управление жизненным циклом изделий.

#### Глава 2. Характеристика условий эксплуатации деталей машин и их физическая сущность.

2.1 Виды эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений.

2.2 Технологические и эксплуатационные показатели качества деталей машин.

2.3 Физические основы пластической деформации, повреждаемости и разрушения деталей машин в процессе эксплуатации.

2.3.1 Теоретическая и техническая прочность.

2.3.2 несовершенства кристаллической решетки

2.3.3 Зависимость сопротивления деформированию и разрушению от числа искажений в кристаллической решетке

2.3.4. Критерии и методы прогнозирования прочности деталей

2.3.5 Энергетическая модель повреждаемости и разрушения поверхностных слоёв при эксплуатации

2.3.6 Физико-химическое воздействие внешней среды на механические свойства поверхностного слоя металлов и сплавов

2.3.7 Физическая модель изнашивания

2.3.8 Физика процесса и виды усталостной повреждаемости и разрушения деталей машин при циклических нагрузках

2.3.9 Физика процесса и виды повреждаемости и разрушения поверхностных слоёв деталей машин в условиях воздействия коррозионных сред.

#### Глава 3. Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с качеством их поверхности

3.1. Характеристика показателей качества поверхностей деталей, обеспечивающих эксплуатационные свойства деталей машин.

3.2 Геометрические показатели качества поверхности и их определение

3.3 Физико-механические показатели качества поверхностного слоя и их определение

3.4 Влияние показателей качества поверхности на эксплуатационные свойства деталей машин.

## Глава 4. Физико-технологические основы способов формирования качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин и методы их реализации

4.1 Обеспечение качества и эксплуатационных свойств деталей машин на стадии конструкторско- технологической подготовки производства.

4.2 Влияние лезвийной и абразивной обработки на показатели качества и эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин.

4.3 Формирование эксплуатационных свойств поверхности детали нанесением покрытий с использованием высококонцентрированных потоков энергии

4.4 Повышение эксплуатационных свойств деталей машин методами поверхностного пластического деформирования (ППД).

4.5 Реновационные технологии продления жизненного цикла деталей машин.

4.5.1. Применение сварки для ремонта и восстановления изделий

4.5.2 Применение наплавки для ремонта и восстановления изделий.

4.5.3. Напыление металлических покрытий

4.5.4. Нанесение полимерных покрытий

4.5.5. Нанесение гальванических покрытий

4.5.6. Заливка жидким металлом

4.5.7. Восстановление деталей пластическим деформированием

## Глава 5. Прогнозирование эксплуатационных свойств деталей машин и пути автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства

5.1 Основные подходы к аналитической оценке и прогнозированию эксплуатационных свойств деталей машин

5.2 Автоматизация обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин на стадии конструкторско- технологической подготовки производства

## Список использованной литературы

## Приложения

## Введение

Одной из важнейших проблем современного машиностроения является улучшение качества, повышение надёжности и долговечности выпускаемых машин и изделий. Надёжность работы машин непосредственно связана с качеством поверхностного слоя деталей, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства – сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и др. Связь характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей свидетельствует о том, что оптимальная (с точки зрения повышения эксплуатационных свойств деталей) поверхность должна быть достаточно твердой, иметь сжимающие остаточные напряжения, мелкодисперсную структуру, сглаженную форму микронеровностей с большей опорной площадью поверхности.

В жизненном цикле изделий машиностроения технологическая подготовка производства занимает особое место. Это объясняется ее значительной трудоемкостью и сложностью. Сроки подготовки производства превышают сроки разработки конструкции изделия от 1,8 до 5 раз, в зависимости от вида и сложности изделий. При освоении производства новых машин решаются разнообразные задачи – от проектирования технологических процессов до разработки специальных средств технологического оснащения. Проектирование технологических процессов обработки и контроля деталей является одним из наиболее распространенных видов деятельности специалиста машиностроительного профиля. При технологическом проектировании решаются две основные задачи: обеспечение требуемого качества изделий, получение минимальной себестоимости технологического процесса.

Искусство организации машиностроительного и ремонтно-восстановительного производства заключается в умении выбрать такую последовательность современных ТП получения заготовок, изготовления деталей, сборки и испытания готовых изделий, а также их ремонта и восстановления в процессе эксплуатации, при которой продолжительность всего цикла и общая стоимость производственных и ремонтно-восстановительных работ заданного количества изделий были бы наименьшими.

В связи с этим будущие специалисты в области конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства, должны иметь более широкий кругозор и комплексность знаний, для того чтобы эффективно использовать как известные, так и новые наукоёмкие технологические способы и методы изготовления, ремонта и восстановления изделий с целью обеспечения их функционального назначения и качества.

Основные разделы, изложенные в учебном пособии, направлены на формирование научного понимания: проблем технологии машиностроения; физических основ процессов, протекающих в поверхностном слое деталей в различных условиях их эксплуатации; физико-технологической сущности механизмов формирования качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей при различных способах обработки; подходов к прогнозированию эксплуатационных свойств деталей машин на стадии конструкторско-технологической подготовки производства и путей её автоматизации.

При подготовке настоящего пособия, авторы придерживались точки зрения, что расширение конструкторско-технологической подготовки специалиста новой формации послужит делу его дальнейшего совершенствования для эффективного использования новых знаний как в современном машиностроительном производстве, так и в сфере сервиса и эксплуатации транспортных и технологических машин и оборудования различного назначения.

В основу написания пособия положены результаты теоретических и экспериментальных исследований российской и зарубежной науки представленные в трудах учёных А.Г.Суслова, Э.В.Рыжова, В.Ф. Безъязычного, А.М.Дальского, А.М.Сулимы, А.П.Бабичева, В.В.Фёдорова, М.Е.Попова, А.Г.Схиртладзе, И.Д. Ибатуллина и др., а также научные исследования проведённые в этом направлении авторами на кафедре « Технология машиностроения» ДГТУ.

## **Глава 1. Жизненный цикл изделий машиностроения.**

### **1.1. Технологическая составляющая жизненного цикла изделия**

*Жизненный цикл изделия* — это совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенном изделии до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации изделия.

*Изделием* в машиностроении называется предмет производства, подлежащий изготовлению на предприятии. Изделием может быть машина, элемент машины и даже отдельная деталь, в зависимости от того, что является продуктом конечной стадии данного производства. Например, для автомобильного завода изделием является автомобиль, для станкостроительного завода – станок, для инструментального завода – режущий или мерительный инструмент.

В соответствии с ГОСТом 2.101-68 устанавливаются следующие виды изделий:

- детали;
- сборочные единицы (узлы);
- комплексы;
- комплекты;
- агрегаты.

*Деталь* является изделием или составной частью изделия, изготовленной из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций. Например, валик, винт, корпус, зубчатое колесо. Деталь – это первичный сборочный элемент каждой машины. *Базовая деталь* – это деталь с базовыми поверхностями, выполняющая в сборочном соединении (узле) роль соединительного звена, обеспечивающего при сборке соответствующее относительное положение других деталей (например, корпус редуктора). Применительно к общей сборке изделий, когда основными сборочными элементами являются уже собранные сборочные соединения, одно из этих соединений, удовлетворяющее изложенному выше требованию (сформулированному для базовой детали), называется базовым сборочным соединением (базовым узлом).

*Сборочной единицей* (узлом) – называется изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии изготовителе или его структурном подразделении (цехе) сборочными операциями, такими как простое соединение деталей, соединение деталей их запрессовкой, свинчиванием, сваркой, пайкой, клеей, склеиванием и т.д. Например, станок, редуктор, сварной корпус, коробка скоростей, ротор турбины, шпиндельный узел.

Характерным признаком сборочной единицы с технологической точки зрения является возможность её сборки обособленно от других элементов изделия в целом (машины). Сборочная единица в зависимости от конструкции

может состоять либо из отдельных деталей, либо из сборочных единиц низшего порядка.

*Комплексом* называется два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций, например, автоматическая линия, станок с ЧПУ с управляющими панелями. В комплекс кроме изделий, выполняющих основные функции, могут входить детали, сборочные единицы и комплекты, предназначенные для выполнения вспомогательных функций, например детали и сборочные единицы, предназначенные для монтажа комплекса на месте его эксплуатации.

*Комплект* представляет собой два и более изделий, не соединенных на предприятии изготовителе сборочными операциями, и представляющие собой набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например, комплекты запасных частей, инструментов, измерительной аппаратуры, упаковочной тары.

*Агрегат* – это сборочная единица, обладающая полной взаимозаменяемостью возможностью сборки отдельно от других составных частей изделия (или изделия в целом) и способностью выполнять определенную функцию в изделии или самостоятельно (например, двигатель).

Жизненный цикл машиностроительных изделий (ЖЦИ) включает ряд этапов, начиная от зарождения идеи нового изделия до его утилизации по окончании срока использования. Основные этапы жизненного цикла машиностроительного изделия представлены на рис.1.1. К ним относятся этапы *проектирования, технологической подготовки производства (ТПП), собственно производства, реализации продукции, эксплуатации, реновации* и, наконец, *утилизации* (в число этапов жизненного цикла могут также входить маркетинг, закупки материалов и комплектующих, предоставление услуг, упаковка и хранение, монтаж и ввод в эксплуатацию). Рассмотрим содержание основных этапов ЖЦИ для изделий машиностроения.

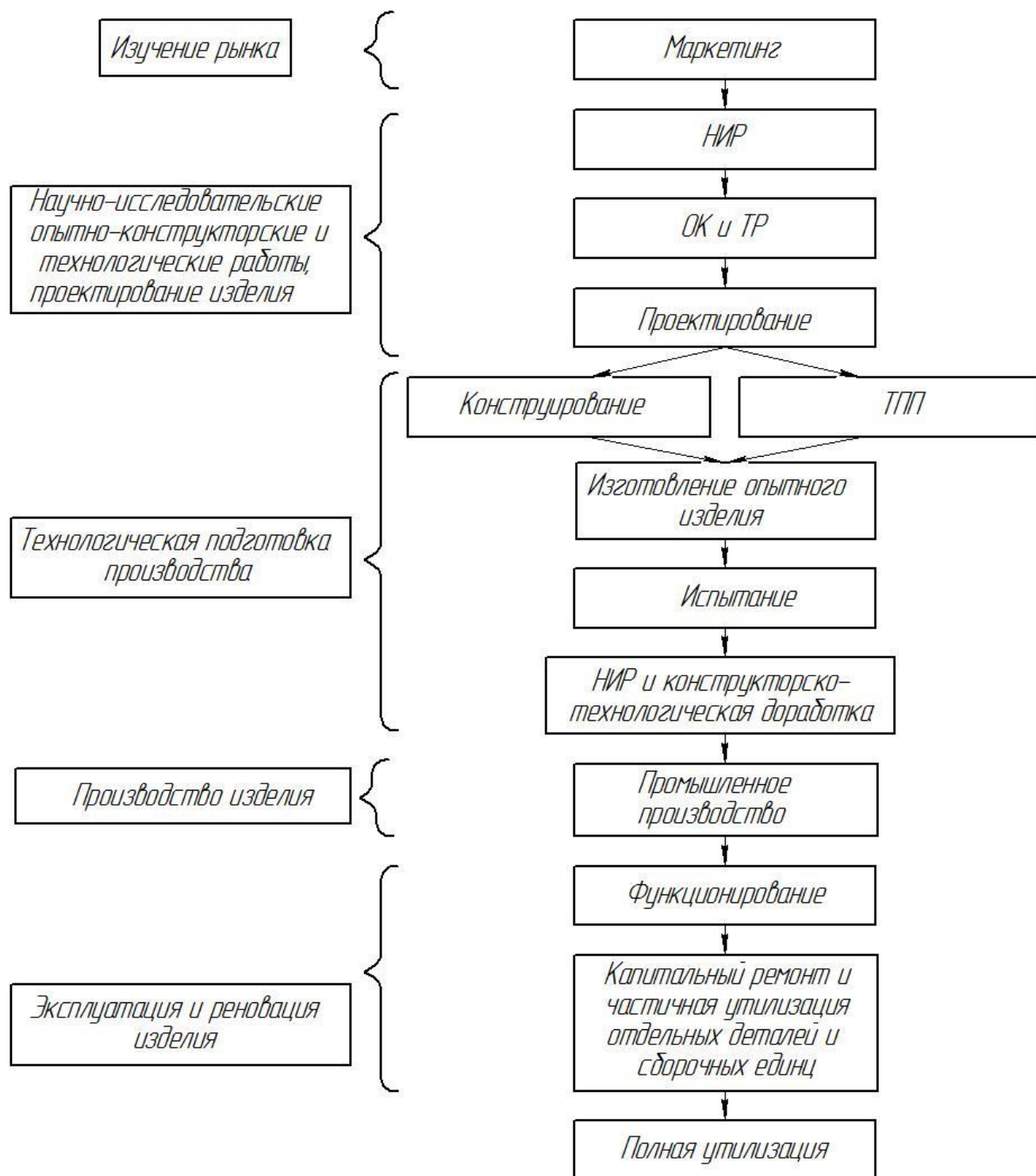


Рис.1.1. Жизненный цикл машиностроительного изделия

На этапе проектирования выполняются проектные процедуры — формирование принципиального решения, разработка геометрических моделей и чертежей, расчеты, моделирование процессов, оптимизация и т.п.

На этапе подготовки производства разрабатываются маршрутная и операционная технологии изготовления деталей, реализуемые в программах для

станков ЧПУ; технология сборки и монтажа изделий; технология контроля и испытаний.

На этапе производства осуществляется календарное и оперативное планирование; приобретение материалов и комплектующих с их входным контролем; механообработка и другие требуемые виды обработки; контроль результатов обработки; сборка; испытания и итоговый контроль.

На постпроизводственных этапах выполняются консервация, упаковка, транспортировка; монтаж у потребителя; эксплуатация, обслуживание, ремонт и восстановление; утилизация.

На всех этапах жизненного цикла имеются свои целевые установки. При этом участники жизненного цикла стремятся достичь поставленных целей с максимальной эффективностью. На этапах проектирования, ТПП и производства нужно обеспечить выполнение требований, предъявляемых к производимому изделию, при заданной степени надежности изделия и минимизации материальных и временных затрат, что необходимо для достижения успеха в конкурентной борьбе в условиях рыночной экономики. Понятие эффективности охватывает не только снижение себестоимости продукции и сокращение сроков проектирования и производства, но и обеспечение удобства освоения и снижения затрат на будущую эксплуатацию изделий. Особую важность требования удобства эксплуатации имеют для сложной техники, например, в таких отраслях, как авиа- или автомобилестроение.

Значительное место в жизненном цикле изделия, а именно его становлении, принадлежит технологии машиностроения, которая как представлено на рис 1.2 включает в себя производство заготовок, изготовление деталей, сборку, контроль и испытание готовых изделий, а также их ремонт и восстановление в процессе эксплуатации.

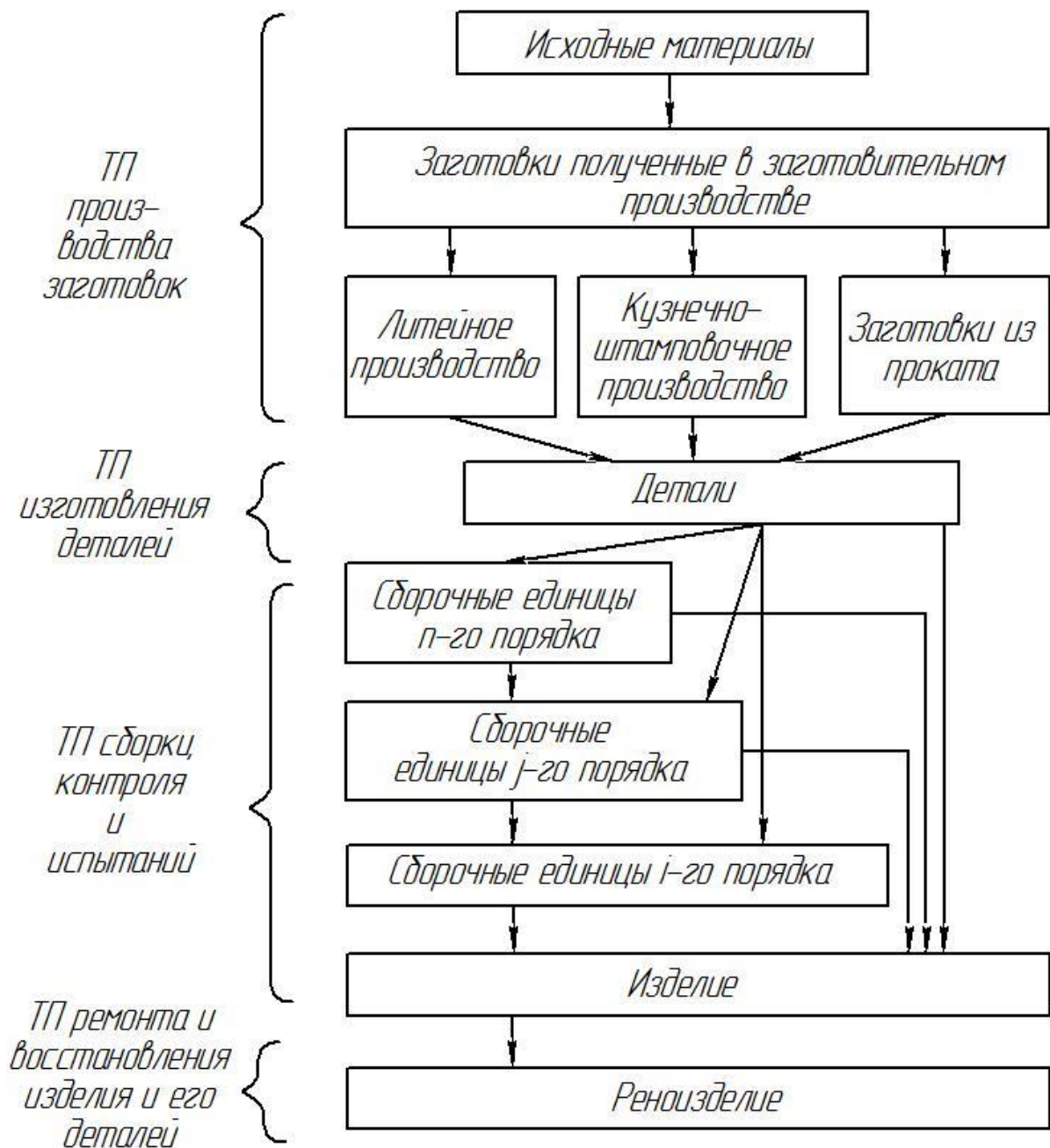


Рис. 1.2. Технологическая структура машиностроительных изделий

Причем, чем раньше в этом цикле будут задействованы технологии, тем выше эффективность и конкурентоспособность изделий машиностроения. Еще на предварительной стадии маркетинга и проработки технологи могут оценить конкурентоспособность технологического процесса, для которого предполагается выпуск изделия. Проведение НИР и опытно-конструкторских работ без учета технологических аспектов практически неэффективно, так как себестоимость, а следовательно и конкурентоспособность изделий определяются их технологической себестоимостью. Поэтому на ранних стадиях

проектирования изделий должна проводиться тщательная проработка их технологичности.

Под *технологичностью конструкции изделий* понимается гарантированная собираемость, обеспечивающая его работоспособность, при достижении необходимой при этом точности входящих в него деталей технически и экономически обоснованными методами

Техническая подготовка производства включает в себя:

- конструкторскую подготовку производства - разработку конструкции изделия и создание его сборочных чертежей, рабочих чертежей деталей, запускаемых в производство, с оформлением соответствующих спецификаций и другой конструкторской документации;

- технологическую подготовку производства (ТПП) - совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства, которая определяется наличием на предприятии полных комплектов конструкторской и технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для выпуска изделий с установленными технико-экономическими показателями в заданном объеме;

- календарное планирование производственного процесса изготовления изделий в установленные сроки при заданных объеме выпуска и затратах;

Основными задачами ТПП являются:

1. Обеспечение технологичности конструкций изделий.
2. Выбор и подготовка заготовок;
3. Разработка технологических процессов;
4. Проектирование средств технологического оснащения;
5. Контроль и управление технологическим процессом.

## **1.2. Сущность реновационного этапа в обеспечении жизненного цикла изделий**

Поскольку эксплуатация изделия сопровождается снижением его качества, возникает необходимость в систематическом поддержании их качества на том уровне, который был, достигнут при проектировании и изготовлении. Эта задача может быть решена двумя способами:

- создание условий эксплуатации, при которых снижение качества изделия, сводится к минимально возможным потерям;

- периодическими реновациями показателей качества путем восстановления и технологического обслуживания с обеспечением уровня качества изделия по возможности близкого к первоначальному уровню (80%).

Известно также, что управление жизненным циклом изделия на стадии их эксплуатации сводится к систематическому контролю качества и

целенаправленному воздействию на те же условия и факторы, которые влияют на качество машин. Это учитывается и на стадии разработки машин.

**Реновация** – это комплекс технологических, конструкторских и организационных мероприятий, направленных на восстановление или придание рабочего ресурса объектам материального производства, а также на использование их по новому назначению с минимальными затратами энергии и материалов, либо на утилизацию их с минимальной экологической вредностью

Основу науки о реновации составляют закономерности подготовки и организации производства к восстановлению изделий, обеспечивающие требуемое качество и заданное их количество с наименьшими затратами труда, энергии и материалов. В то же время опыт ремонта самолетов, судов, тепловозов, автомобилей и двигателей силами заводов-изготовителей, а также опыт ремонта машин западными фирмами свидетельствуют о возможности достижения послеремонтной наработки объектов не меньше, чем у новых изделий, при затратах, не превышающих 60% затрат на их производство. Практика показывает, что научно-обоснованная технология и организация восстановления деталей позволяет достичь нормативной наработки техники, а в отдельных случаях и превзойти наработку новых изделий.

Применительно к повышению ресурса деталей, *реновация* – это технологический процесс восстановления деталей путем возвращения им утраченной части материала из-за изнашивания и (или) доведения до нормативных значений уровня свойств показателей качества, изменившихся за время их длительной эксплуатации в изделии. Обоснованный процесс реновации обеспечивает повышение ресурса деталей со свойствами, отвечающих требованиям конструкторско-технологической документации или превосходящими их.

При изготовлении, например, одного коленчатого вала автомобильного двигателя расходуют 57 кг металла, (масса отходов- 2,5 кг); при реновации эти величины в 20 раз меньше.

Для поддержания или восстановления исходных характеристик изделия в машиностроении, обеспечения его жизнедеятельности прибегают к его восстановлению на различных стадиях эксплуатации. Номенклатура восстанавливаемых изделий весьма широка и многообразна. Это – изделия промышленного назначения: транспортные средства (автотранспорт, авиация, суда, подвижной состав железных дорог и др.), изделия бытового назначения, медицинская техника и инструменты, и многое другое.

*Ренопригодное изделие* - это изделие, которое утратив свои свойства, предусмотренные конструкторско-технологической документацией, в процессе

эксплуатации, подлежит восстановлению или ремонту или может быть использовано по новому назначению.

Как показывает практика реновации изделий, ресурс дальнейшей работы любого изделия ограничивается 2...3 десятками деталей, которые частично или полностью утратили свою работоспособность в связи с достижением предельного состояния из-за поломки и износа. Предельное состояние этих деталей определяется тем, что их дальнейшее применение по назначению технически невозможно или экономически нецелесообразно. При достижении предельного состояния деталь может обладать или нет остаточной долговечностью. В первом случае деталь может быть восстановлена и ее признают ренопригодной, а во втором – она утилизируется.

Деталь, признанная пригодной для процесса реновации, в частности для восстановления утраченных в процессе эксплуатации свойств, называют *ренозаготовкой*.

Остаточная долговечность ренопригодного изделия – это потенциальная долговечность изношенных деталей, которая может быть использована в эксплуатации после выполнения экономически обоснованного объема восстановительных работ.

Ренопригодная деталь в условиях ремонтно-восстановительного производства проходит путь от ренозаготовки до ренодетали.

Конструктивная форма ренозаготовки аналогична дефектной детали. Каждая поверхность ренозаготовки продолжает иметь своё предопределенное функциональное назначение.

*Ренодеталь* – это изделие, полученное в результате проведения экономически обоснованных ремонтно-восстановительных работ по восстановлению физико-механических свойств и геометрических размеров детали, утраченных в процессе эксплуатации, в соответствии с требованиями конструкторско-технологической документации и пригодная для дальнейшего использования.

Ряд значений ренодетали определен нормативной документацией, они являются ограничениями, которые обеспечивают не менее чем 80%-ную послеремонтную наработку детали от наработки нового изделия.

**Этапы реновации изделия.** В условиях новых подходов к восстановлению изделия можно представить следующие этапы реновации:

- обоснование необходимости реновации изделия;
- научно-технические исследования целевого использования реновационного изделия;
- разборка изделия, оценка состояния, осмотр, замена отдельных элементов деталей и узлов;

- разработка конструкторского проекта на вновь вводимые узлы;
- изготовление вновь вводимых изделий и узлов;
- сборка оборудования совместно с вводимыми реновационными деталями и узлами;
- испытание и доводка вводимых образцов.

При восстановлении деталей обеспечивают нормативные значения функциональных и ресурсных показателей. Функциональные показатели характеризуют исправность детали, а ресурсные – степень восстановления технического ресурса. При восстановлении деталей, в том числе и их поверхностей, доводят до нормативных значений следующие показатели:

- промышленную чистоту поверхностей;
- размеры и форму;
- износостойкость трущихся поверхностей;
- прочность, сплошность, структуру материалов;
- усталостную прочность;
- жесткость упругих деталей;
- взаимное расположение и точность формы поверхностей;
- шероховатость поверхностей;
- значение массы детали и ее распределение относительно осей вращения и инерции;
- коррозионная стойкость.

Современная система качества восстановления деталей строится в соответствии с требованиями стандарта новых ИСО 9000 и ИСО 9004.

Важным условием рациональной эксплуатации изделий является их своевременный, качественный ремонт, а также правильный уход за ними. В процессе работы отдельные поверхности машин подвергаются износу, разрушению, коррозии или выходят из строя по другим причинам. Задачей реновации является своевременное восстановление работоспособности изделий в минимально возможные сроки и с наименьшей затратой труда, материалов и денежных средств. Качественный ремонт имеет большое значение для повышения долговечности и надежности работы изделия, снижения эксплуатационных расходов.

Перспективные изношенные детали, полученные в результате разборки, очистки машины, узлов и дефектации деталей, значительно дешевле заготовок машиностроения, изготовленных в литейном или кузнечно – штамповочном производствах. При использовании ренозаготовки обрабатывают меньшее число поверхностей, что объясняет меньшую трудоемкость обработки.

### **1.3 Управление жизненным циклом изделий.**

Управление жизненным циклом изделий является системной, комплексной задачей, для которой необходимо установить взаимосвязь между тремя основными элементами: исходными свойствами и состоянием материалов, условиями эксплуатации и ресурсом, для того чтобы, задавшись (или управляя) двумя из этих элементов, можно было обоснованно регламентировать (или воздействовать на) третий. С точки зрения практической ценности можно выделить прямую и обратную постановку задачи управления ЖЦИ. Первая состоит в прогнозировании ресурса материалов по имеющимся данным об исходных и текущих свойствах объекта и условиях его эксплуатации. Вторая – в выборе и нормировании свойств материалов для обеспечения их требуемого ресурса в заданных условиях эксплуатации. Центральным звеном системы управления ЖЦИ должны стать физически обоснованные многофакторные расчетные модели; в качестве таковой может быть использована энергетическая модель повреждаемости и разрушения поверхностных слоёв при эксплуатации. Исследования показали, что адекватную картину деградации материалов как при разрушении поверхностей трением, так и при объемной усталости можно получить с помощью обобщенного энергетического критерия пластичности – энергии активации пластической деформации, изменение которой в процессе эксплуатации оборудования характеризует скорость исчерпания его ресурса [1]. По критической величине энергии активации можно судить о предельном (безопасном) состоянии материала.

Современные системы управления ЖЦИ служат в основном для возможности продления эксплуатации ответственных объектов, выработавших назначенный ресурс, что является весьма ограниченным представлением о возможностях таких систем и круге прикладных задач, которые можно успешно решать с их помощью. При более широком рассмотрении анализ возможных схем реализации систем управления ЖЦИ показал, что их можно классифицировать по ряду признаков.

Система управления ЖЦИ имеет много общего с системой качества, внедренной на множестве современных предприятий согласно требованиям стандартов серии ИСО 9000. Однако их главное различие состоит в том, что система качества направлена на реализацию полного соответствия технологии изготовления изделий действующим нормативным документам с целью поддержания гарантированного уровня качества изделий, в то время как система управления ЖЦИ направлена на постоянное улучшение их технических характеристик, что приближает ее к известной системе управления качеством TQM. Главная особенность системы управления ЖЦИ состоит в том, что единственным критерием в ней является технический ресурс изделия, на основе которого производится управление его сроком службы с целью обеспечения

эксплуатационной надежности. И все данные о свойствах материалов, применяемые модели, программное обеспечение и т.д. направлены на оценку, обеспечение и повышение ресурса изделия.

**Виды систем управления ЖЦИ по способу управления.** По способу управления системы управления ЖЦИ можно разделить на активные и пассивные.

*В активных системах* управления ресурсом предполагается на всех этапах предпринимать меры по целенаправленному воздействию на свойства материала и условия его функционирования, а также по оптимизации технологических процессов на этапе изготовления объекта. Так, активная система управления сроком службы технических систем на этапе эксплуатации требует их постоянного совершенствования (модернизации, ремонта), что наряду с заложенным при конструировании и изготовлении избыточным запасом прочности дает основание для многократного продления их службы на дополнительный срок. При использовании в системе энергетических моделей для прогнозирования ресурса при усталостной повреждаемости объекта активное управление сводится к оперативному воздействию на текущее состояние материала, а именно на его энергию активации пластической деформации. В ряде случаев при эксплуатации ответственных, и особенно опасных объектов условия их изготовления и использования строго регламентированы, что делает затруднительным применение активных систем управления; тогда единственным средством управления сроком службы являются пассивные системы.

*В пассивных системах* управления ЖЦИ предполагается лишь наблюдение за естественным изменением свойств (контроль старения) материала и контроль за исчерпанием заложенного при изготовлении объекта запаса прочности с тем, чтобы на основе имеющихся критериев дать заключение о возможности дальнейшего безопасного использования объекта или о необходимости вывода его из эксплуатации. Еще одно назначение пассивных систем – сбор информации и формирование базы данных об условиях функционирования объекта, о кинетике и механизмах его повреждаемости и разрушения, о режимах технологической обработки, о долговечности объекта и т. д. Данные сведения необходимы для анализа адекватности применяемых расчетных моделей, оценки параметров надежности, т.е. для реализации «обратной связи» в системе управления ЖЦИ. Пассивная система управления ЖЦИ также предполагает установление даты окончания работы технических систем (предотвращающей досрочный вывод из эксплуатации) и обеспечение последних лет службы на основе диагностики технических систем.

Активные и пассивные системы глубоко взаимосвязаны и могут использоваться совместно в рамках решения как прямых, так и обратных задач управления. Такое комбинированное управление жизненным циклом изделий представляется наиболее эффективным.

***Виды систем управления ЖЦИ по этапу реализации.*** Управление ресурсом возможно на всех этапах жизненного цикла изделия.

*На стадии конструирования* в материал необходимо заложить запас прочности, достаточный для заданного срока службы изделия. Для этого необходимы научно обоснованные методы регламентирования механических свойств изделий, выбора смазочных материалов. Регламентируются допуски и припуски, параметры микрогеометрии. При конструировании также предусматриваются средства снижения динамических напряжений, охлаждения материала, устраняются участки концентрации напряжений. При этом в последнее время все чаще используют средства компьютерного конечно-элементного моделирования.

*На этапе производства* происходит технологическое обеспечение заданного ресурса. Основное внимание при этом уделяется упрочняющим технологиям и сборке. Важным этапом производства является контроль качества изделий. Здесь в последнее время на лидирующие позиции выходит применение ускоренных методов испытаний, но для этого необходимо строгое обоснование режимов форсированных испытаний, что представляет собой весьма непростую задачу, которая в настоящее время решается поиском эмпирической корреляции между результатами обычных и ускоренных испытаний.

*На стадии эксплуатации* происходит рациональная реализация заложенного в изделие ресурса. При нормировании показателей надежности, как правило, пользуются принципом избыточности, вследствие чего после выработки назначенного срока службы у изделий часто остается запас прочности, но величина его случайна и требует при эксплуатации дополнительной оценки. Это требует корректных методов диагностики и прогнозирования остаточного ресурса, основанных на адекватных критериях прочности. Аналогичная ситуация возникает, когда в эксплуатацию вводятся детали, имевшие ранее наработку, для которых нужно оценить выработанный ресурс. Диагностика состояния материалов необходима перед ремонтом (восстановлением) изношенных деталей.

***Виды систем управления ЖЦИ по характеру решаемой задачи.*** Система управления ЖЦИ характеризуется наличием прямых и обратных связей между воздействием на материал и его ресурсом. Эти связи являются, по сути, причинно-следственными, их анализ производится на основе экспериментального исследования объектов и их моделей. Если принять

направление решения задачи от совокупности причин и условий к следствию как прямое, то противоположный анализ будет, соответственно, являться обратным. Таким образом, в прямой постановке задачи система управления ЖЦИ воздействует на ресурс за счет управления свойствами самого объекта, в обратной – за счет управления условиями его изготовления и эксплуатации. В первом случае исходными данными для управления жизненным циклом являются фактическое состояние, свойства материала и условия работы. Во втором – на основе заданного (или известного) ресурса и выявленных при испытаниях или эксплуатации данных о механизмах и кинетике повреждаемости материалов корректируются их свойства, обеспечиваются щадящие условия работы. При решении обратной задачи, например, для повышения ресурса узлов трения создают условия для снижения энергии разрушающих механических, термических и химических воздействий, что реализуется соответственно применением демпферов, охладителей, ингибиторов коррозии и т.д. Кроме того, путем сбора и сопоставления расчетных и экспериментальных данных проверяется прогностическая способность применяемой для управления ресурсом совокупности математических, расчетных, конечно-элементных и других моделей объекта, что необходимо для совершенствования самой системы управления ЖЦИ. С точки зрения теории надежности, решение прямых задач связано с применением физики отказов, использующей физические и математические модели объекта. Решение же обратных задач, как правило, выполняется по статистическим моделям отказов.

***Виды систем управления ЖЦИ по цели управления.*** Можно выделить две основные цели управления ресурсными характеристиками материала: первая и основная цель заключается во всемерном повышении безотказного срока службы изделия, т.е. в повышении долговечности материалов в существующих условиях функционирования; вторая – в тарированном понижении долговечности, что актуально, например, при разработке методик ускоренных испытаний. В первом случае имеет место ресурсоповышающая система, во втором – ресурсосберегающая. Наименование последней обусловлено тем, что повышение ресурса достигается за счет дополнительных материальных, энергетических и временных затрат на повышение прочности материала. Причем с повышением показателей качества отношение приращения долговечности объекта к приращению затрат на обеспечение его надежности нелинейно возрастает. Поэтому, как известно, показатели надежности нормируются, например, по критерию минимальной стоимости жизненного цикла изделия. Одним из эффективных способов снижения затрат на изготовление сложных объектов является выравнивание разрыва между долговечностями (для восстанавливаемых изделий – средней наработки на отказ) самого «слабого» и

самого надежного элементов в системе. Таким образом, по отношению к первым элементам целесообразно применение ресурсоповышающего воздействия, а по отношению ко вторым – ресурсосберегающего.

## **Глава 2. Характеристика условий эксплуатации деталей машин и их физическая сущность.**

### **2.1 Виды эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений**

Деталь представляет комплекс взаимосвязанных поверхностей, посредством которых она выполняет своё служебное назначение. По функциональному назначению у детали различают исполнительные и свободные поверхности, вспомогательные и основные базы.

На каждую деталь в машине или сборочной единице возлагается исполнение определённых функций, вытекающих из общего функционального назначения машины или сборочной единицы. Безотказность и долговечность исполнения своих функций изделием машиностроения определяется рядом эксплуатационных свойств деталей и их соединений.

Под *эксплуатационными свойствами* деталей машин понимается способность деталей машин сопротивляться условиям внешнего физико-механохимического воздействия на них.

В зависимости от условий внешнего воздействия (трение, статические или динамические нагрузки, химически активные среды и др.) должны быть сформированы следующие эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений: контактная жёсткость, износостойкость, статическая и усталостная объёмная прочность, коррозионная стойкость, герметичность соединений, прочность посадок, статическая и динамическая поверхностная контактная прочность. Все эти эксплуатационные свойства в значительной мере зависят от качества поверхностного слоя деталей, так как практически все разрушения (статические, усталостные, контактные, коррозионные и др.) начинаются с поверхности.

Дадим определения и краткую характеристику основных эксплуатационных свойств.

**Контактная жёсткость.** Контактная жесткость определяет способность поверхностных слоёв деталей, находящихся в контакте, сопротивляться действию сил стремящихся их деформировать:

$$j = \frac{P}{y_k}, \quad (2.1)$$

где  $P$  – сила на площади контакта;  $y_k$  - контактные перемещения.

Контактная жёсткость составляет значительную часть в балансе упругих перемещений машин и сборочных единиц (Рис. 2.1). Контактная жёсткость

сказывается на точности работы машин и приборов, на точности обработки на металлорежущих станках и т.д., т.е. на качестве машиностроительных изделий.

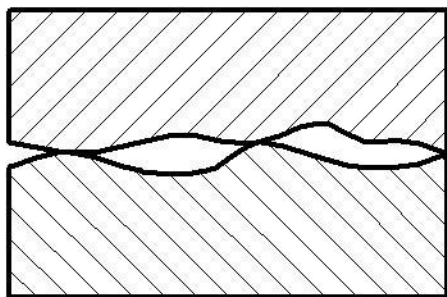


Рис. 2.1. Схема контакта двух твердых тел (деталей).

**Износостойкость поверхности.** Работа машин во многом обусловлена таким физическим феноменом, как трение, которое проявляется в сопротивлении движению тел. Основные понятия, связанные с трением и сопутствующими ему явлениями определены в государственном стандарте (ГОСТ 23002-78).

*Трение (внешнее трение)* – сопротивление относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зоне соприкосновения поверхностей по касательной к ним и сопровождаемое рассеянием энергии.

Трение не является однозначно вредным или полезным. Это зависит от обстоятельств его возникновения и применения. Трение в механизмах чаще принято относить к вредным сопротивлениям из-за создаваемых им механических потерь, нагрева и износа деталей. Однако всем очевидна и огромная польза трения, например, при торможении машин, гашении опасной вибрации или прогулках по гололёду, особенно в горах.

В процессе эксплуатации механизма, машины или прибора неизбежно происходит изнашивание элементов его кинематических пар – разрушение и отделение материала с поверхности с постепенным изменением размеров и формы. Это снижает прочность деталей и точность механизма, кроме того, повышаются нагрузки, растёт вибрация и шум вследствие зазоров в кинематических парах. В дальнейшем изнашивание может привести к поломке деталей и выходу машины из строя. Количественной оценкой результата изнашивания является *износ*, определяемый в установленных единицах.

*Износ* – результат *изнашивания*, выраженный в единицах длины, объёма или массы. Допустимый износ не нарушает работоспособность детали. Предельный износ соответствует предельному состоянию изделия, когда дальнейшая его эксплуатация невозможна. При трении со смазочным материалом, когда его толщина между деталями больше высоты неровностей – износ очень незначителен.

Одним из важнейших эксплуатационных свойств деталей машин является износостойкость. Под *износостойкостью* понимают способность поверхностных

слоёв деталей сопротивляться разрушению при действии сил трения. Кривая износа имеет три явно выраженных участка (Рис. 2.2): I - начальный участок кривой характеризующий процесс приработки нового сопряжения, II - участок кривой, характеризующийся небольшой и относительно постоянной по величине скоростью износа, отвечающей периоду нормальной работы сопряжения - участок нормального износа или естественный износ, III - участок катастрофического износа, то есть участок, на котором скорость износа резко возрастает.



Рис. 2.2 Кривая износа.

Приблизленно сопротивление изнашиванию (износостойкость) оценивают, в частности, сопоставлением расчетных давлений с допускаемыми значениями, установленными на основе опыта эксплуатации конструкции. Инженерные расчёты по износу кинематических пар выполняют по интегральным характеристикам: скорости и интенсивности изнашивания.

*Скорость изнашивания* – отношение износа ко времени, за которое он возник

$$\gamma_h = dI_h / dt = \Delta I_h / \Delta t \text{ (мкм/ч)}. \quad (2.2)$$

*Интенсивность изнашивания* – отношение износа к пробегу, наработке или объёму выполненной работы. Различают износ линейный  $I_h$ , массовый  $I_m$  и объёмный  $I_v$ . Отношение износа к пути трения  $L_T$ , на котором произошёл этот износ, характеризует *интенсивность изнашивания*, соответственно:

- линейную  $I_h = I_h / L_T$  (мкм/км);
- массовую  $I_m = I_m / L_T$  (г/км);
- объёмную  $I_v = I_v / L_T$  (мм<sup>3</sup>/км).

Линейная интенсивность изнашивания изменяется в широких пределах  $10^{-3} \dots 10^{-13}$ . Конкретные значения для разных условий получают экспериментально.

Отношение объёма изношенного материала к работе сил трения  $F_T$  называют *энергетической интенсивностью изнашивания*.

Износ охватывает около 80% деталей. В зависимости от характера происходящих процессов различают следующие виды изнашивания:

- *механическое* – результат механического взаимодействия;
- *абразивное* – результат режущего и царапающего действия твёрдых частиц, находящихся в зоне контакта деталей (на рабочей поверхности наблюдаются царапины, канавки, полосы);
- *эрозионное* – результат воздействия потоков жидкости и газа;
- *гидроэрозионное (газоэрозионное)* – результат воздействия жидкости (газа);
- *гидроабразивное (газоабразивное)* – результат воздействию твёрдых частиц, взвешенных в жидкости (газе);
- *коррозионно-механическое* – механический контакт в сочетании с химическим и/или электрическим взаимодействием материала со средой (на рабочей поверхности наблюдаются плёнки, частицы, продукты реакций);
- *усталостное* – результат усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъёмов материала, наблюдается как при трении скольжения, так и при трении качения (на рабочей поверхности наблюдаются трещины, выкрашивание);
- *кавитационное* – гидроэрозионное при движении тела в жидкости, когда пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности с местным повышением давления и температуры;
- *изнашивание при заедании* – преимущественно наблюдается при высоких скоростях и давлениях с выдавливанием разъедающей трущиеся поверхности масляной пленки. В результате тепло не успевает отводиться, и происходит схватывание (сварка) частиц металла контактирующих поверхностей с дальнейшим отрывом их от более мягкой поверхности и прочным соединением с более твердой. Образовавшиеся неровности царапают рабочие поверхности деталей с более мягкой поверхностью, что приводит к выходу их из строя (на рабочей поверхности наблюдаются чешуйки, выступы, выкрашивание);
- *окислительное* – аналогично *коррозионно-механическому*, но под основным влиянием химических реакций с кислородом или окисляющей средой;
- *фреттинг* – при малых относительных колебательных движениях контактирующих поверхностей;
- *электроэрозионное* – в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

В обычных условиях сочетаются разные виды изнашивания, что очень затрудняет анализ условий работы машин.

**Коррозионная стойкость.** Под *коррозионной стойкостью* понимают способность поверхностных слоёв сопротивляться разрушающему действию внешней среды. *Коррозия металлов* - разрушение металлов вследствие физико-химического воздействия внешней среды, при этом металл переходит в окисленное (ионное) состояние и теряет присущие ему свойства.

Особое место в комплексе мероприятий по обеспечению бесперебойной эксплуатации оборудования отводится надежной защите его от коррозии. Необходимость осуществления мероприятий по защите от коррозии диктуется тем обстоятельством, что потери от коррозии приносят чрезвычайно большой ущерб. По имеющимся данным, примерно около 10% ежегодной добычи металла расходуется на покрытие безвозвратных потерь вследствие коррозии и последующего распыления. Основной ущерб от коррозии металла связан не только с потерей больших количеств металла, но и с порчей или выходом из строя самих металлических конструкций, т.к. вследствие коррозии они теряют необходимую прочность, пластичность, герметичность, тепло- и электропроводность, отражательную способность и другие необходимые качества. К потерям должны быть отнесены также громадные затраты на всякого рода защитные антикоррозионные мероприятия, ущерб от ухудшения качества выпускаемой продукции, выход из строя оборудования, аварий в производстве и др.

**Герметичность соединений.** Герметичность соединений определяет их способность предотвращать утечку газа или жидкости. Наибольший интерес для обеспечения герметичности неподвижных металлических соединений представляют С-образные металлические уплотнения, представляющие собой внутреннюю часть разрезанного тонкостенного полого шара, помещённого в канавке открытого или полуоткрытого типа.

**Прочность посадок с натягом.** Под прочностью посадок с натягом понимается их способность передавать крутящий момент и осевые нагрузки без взаимного проскальзывания деталей. Обеспечивается это условие в результате соединения деталей с натягом (Рис. 2.3).

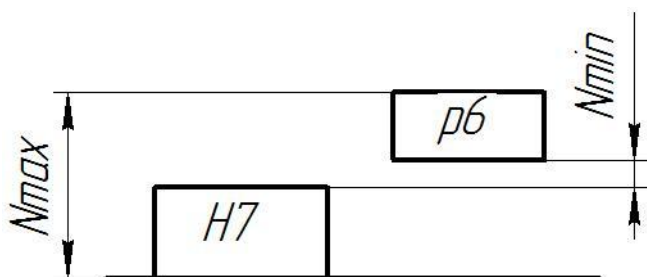


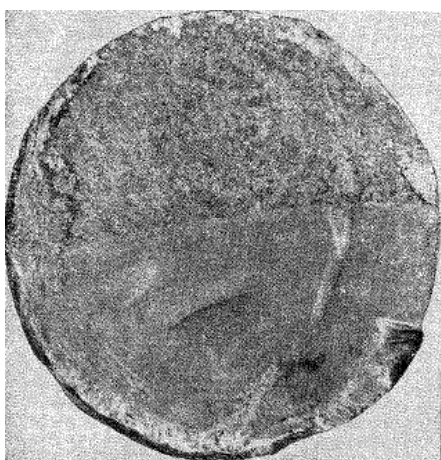
Рис. 2.3. Расположение полей допусков в посадке с гарантированным натягом:  $N_{max}$  - максимально возможный натяг в посадке,  $N_{min}$  - минимально возможный натяг в посадке

**Статическая объёмная прочность.** Под статической объёмной прочностью понимают способность детали сопротивляться разрушению при действии постоянных во времени нагрузок.

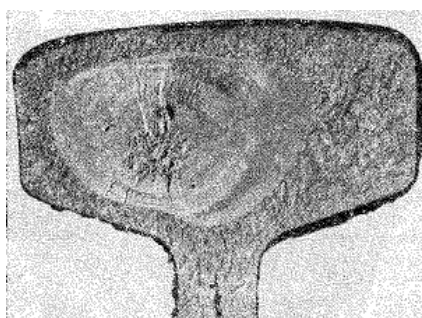
**Усталостная объёмная прочность.** Многие детали машин и механизмов, а также конструкции сооружений в процессе эксплуатации подвергаются циклически изменяющимся во времени воздействиям. Если уровень напряжений, вызванный этими воздействиями, превышает определенный предел, то в материале формируются необратимые процессы накопления повреждений, которые в конечном итоге приводят к разрушению системы.

Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием переменных напряжений, приводящих к разрушению, называется *усталостью*. У детали повреждения в процессе усталости накапливаются и являются необратимыми. Свойство материала противостоять усталости называется *выносливостью*, то есть усталостная объёмная прочность характеризуется сопротивлением усталости или выносливостью. Под сопротивлением усталости деталей машин понимают их способность сопротивляться разрушению при действии знакопеременных нагрузок. Разрушение материала при знакопеременных нагрузках начинается в основном с поверхности детали, потому его качество, зачастую, является решающим в обеспечении этого эксплуатационного показателя.

На рис. 2.4 представлен внешний вид усталостного излома. На фотографии (рис.2.4 а) видно, что разрушение бруса произошло в результате развития усталостной трещины, образовавшейся у края сечения. Разрушение рельса (рис.2.4 б) обусловлено развитием усталостной трещины, образовавшейся внутри сечения в зоне местного дефекта.



а



б

Рис. 2.4. Усталостный излом: а - круглый брус, б - рельс.

Для большинства черных металлов можно указать такое наибольшее максимальное напряжение, при котором материал не разрушается при любом числе циклов. Такое напряжение называется *пределом усталости*, или *пределом выносливости*  $\sigma_r$ , где индекс  $r$  соответствует коэффициенту цикла. Так, для симметричного цикла обозначение предела выносливости принимает вид  $\sigma_{-1}$ , для пульсирующего  $\sigma_0$  или  $\sigma_{\pm\infty}$  и т. д. Для цветных металлов и для закаленных до высокой твердости сталей не удастся установить такое число циклов, выдержав которое, образец не разрушился бы в дальнейшем. Поэтому в подобных случаях вводится понятие условного предела выносливости. За условный предел выносливости принимается напряжение, при котором образец способен выдержать  $10^8$  циклов.

Предел усталости не является характеристикой только свойств материала, как, например, модуль упругости или коэффициент Пуассона. Он зависит также от метода ведения испытаний. Расчетное напряжение для образца не определяет полностью процесс усталостного разрушения. В результате образования трещины величина напряжений и законы их распределения в образце непрерывно меняются в зависимости от условий дальнейшего развития трещины. Последние же в свою очередь зависят от абсолютных размеров образца и характера приложения внешних сил. Все это неминуемо сказывается на предельном числе циклов и на величине предела усталости. Например, предел усталости, полученный в условиях циклического растяжения и сжатия, оказывается на 10—20% ниже, чем предел усталости, полученный при изгибе. Предел усталости при кручении сплошных образцов отличается от предела усталости, полученного для полых образцов, и т. п.

***Статическая и динамическая поверхностная контактная прочность.*** Под *статической контактной прочностью* понимается способность поверхностных слоёв сопротивляться разрушению при статическом контактом взаимодействии с твёрдым телом. Статические контактные разрушения наступают при превышении контактных давлений величины допускаемых контактных напряжений. Под *динамической контактной прочностью* понимается способность поверхностных слоёв сопротивляться разрушению при динамическом контактом взаимодействии с твёрдым телом. Динамичность нагружения характеризуется либо скоростью удара  $V$ , либо скоростью деформации  $\epsilon$ , либо скоростью изменения напряжения  $\sigma$ , которая зависит от скорости приложения нагрузки. Контактное взаимодействие твёрдых тел при динамических нагрузках в значительной мере определяется пластическими контактными деформациями, зависящими как от начальной скорости соударения

$V_0$ , так и от физико-механических свойств поверхностного слоя, которые подвергаются технологическому управлению.

## **2.2 Технологические и эксплуатационные показатели качества деталей машин.**

Под показателем качества понимают количественную характеристику одного или нескольких свойств изделия, входящих в её качество, рассматриваемая применительно к определённым условиям её создания и эксплуатации или потребления. Показатели качества детали подразделяют на технологические и эксплуатационные.

*Технологические показатели качества* - это показатели, обеспечиваемые в процессе изготовления или восстановления изделия: точность линейных размеров; точность взаимного положения поверхностей; показатели качества поверхностного слоя; геометрические и физико-механические.

*Эксплуатационные показатели качества* деталей машин - это такие показатели, как показатели назначения, надёжности, долговечность, эргономические показатели и др.

*Надёжность* – это свойство детали сохранять в течение определённого времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции при заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надёжность является комплексным показателем и в зависимости от назначения детали и условий её применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

*Безотказность* - это свойство детали непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение определенного времени или наработки.

*Долговечность* - это свойство детали сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

*Ремонтпригодность* - это свойство изделия, заключающееся в его способности поддерживать и восстанавливать работоспособное состояние путём технического обслуживания и ремонта.

*Сохраняемость* - это свойство изделия сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в течение и после хранения и транспортирования.

## **2.3 Физические основы пластической деформации, повреждаемости и разрушения деталей машин в процессе эксплуатации.**

### **2.3.1 Теоретическая и техническая прочность.**

Различают техническую и теоретическую прочность. Под *технической прочностью* понимают сопротивление реальных тел упругой и пластической деформации и разрушению. Её определяют экспериментально. *Теоретическую прочность* металлов определяют из условий деформации или разрушения в упругой области идеальной решётки монокристалла, в которой действию внешней нагрузки противостоит межатомная связь.

Прочность межатомной связи в кристаллах является основным фактором, определяющим сопротивление деформированию и разрушению металлов. Энергия межатомной связи в металлах представляет собой работу диссоциации (распад сложных комплексов на составляющие компоненты и элементы) металлического кристалла при абсолютном нуле на газ положительных ионов и электронов. Общая потенциальная энергия  $U$  взаимодействия ионов и электронов (энергия связи) является функцией межатомного расстояния и для твердого состояния может быть представлена полуэмпирическим выражением вида

$$U = \frac{A}{r} + \frac{B}{r^2} \quad (2.3)$$

где  $A$  и  $B$  — константы;  $r$  — межатомное расстояние.

В этом уравнении первый член — соответствует энергии электростатического притяжения между положительными ионами и электронами, а второй — кинетической энергии электронов, обуславливающей действие силы отталкивания в кристалле.

Зависимости потенциальной энергии и силы связи от межатомного расстояния представлены на рис. 2.5.

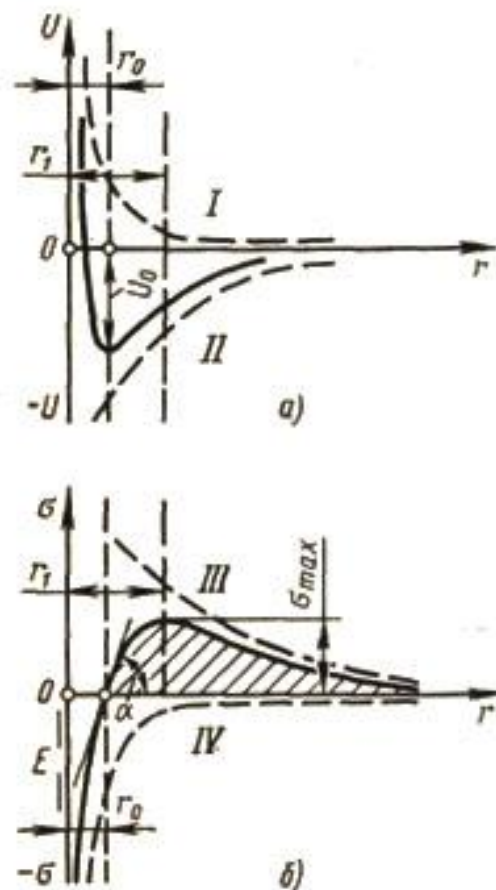


Рис. 2.5. Зависимость потенциальной энергии (а) и межатомной силы связи (б) от межатомного расстояния  $r$ . Здесь  $I$  — энергия отталкивания;  $II$  — энергия притяжения;  $III$  — сила притяжения;  $IV$  — сила отталкивания.

Максимальное значение межатомной силы связи  $\sigma_{\max}$  в точке  $r_1$  и есть теоретическая прочность при растяжении. Несоответствие между теоретической и наблюдаемой прочностью кристаллических тел является результатом того, что внутреннее строение реального металла отличается от идеального. Кристаллическая решетка реального твердого тела обладает большим числом дефектов, отклонений структурных элементов от правильного положения.

Для обычных условий получения металла дефектность и неоднородность зерен — явления нормальные и практически неизбежные. При расчете теоретической прочности не учитывается структура металла со всеми ее несовершенствами и пластическая деформация, которая часто предшествует разрушению.

Для количественной оценки энергии и сил межатомной связи в кристаллических телах могут быть использованы энергия сублимации (переход вещества из твердого состояния непосредственно (без плавления) в газообразное), среднее квадратичное отклонение амплитуды тепловых колебаний, температура плавления, характеристическая температура

(температура Дебая), параметры диффузии, упругие постоянные и другие физические величины. Однако при решении проблемы прочности не все они равноценны, так как по-разному связаны с механизмом пластической деформации и разрушения металлов. Глубокий анализ этих величин и возможности использования их для оценки прочности межатомной связи, проведенный С. Т. Кишкиным и К. А. Осиповым [2], показывает, что нет однозначной количественной зависимости между прочностью кристаллических тел и какой-либо из этих физических величин, принятой за меру межатомной связи. Это обусловлено тем, что прочность является структурно-чувствительным свойством материала в упругой и пластической областях.

Однако, несмотря на то, что не наблюдается однозначная зависимость между сопротивлением пластической деформации, сопротивлением разрушению и величинами, характеризующими межатомную связь, все же можно отметить определенную тенденцию увеличения прочности с повышением температуры плавления или энергии связи.

### **2.3.2 Несовершенства кристаллической решетки.**

Искажения атомной решетки в зависимости от их геометрии подразделяются на точечные, линейные и поверхностные.

*Точечные дефекты* — это нарушения решетки в изолированных друг от друга точках решетки. К таким дефектам относятся вакансии (узлы решетки, в которых нет атомов), замещающие атомы или примеси (замещение в узле решетки основного атома каким-либо атомом иной природы), атомы внедрения или дислоцированные атомы (инородные атомы или атомы основного вещества, расположенные в междоузлиях решетки). Размеры этих дефектов примерно равны атомному диаметру. К точечным дефектам решетки относятся также сложные точечные дефекты, представляющие собой сочетания различных точечных несовершенств («облака» вакансий или атомов в междоузлиях, «парный дефект Френкеля», дефект Шотки). Существование подобных «сложных» точечных дефектов твердо не установлено, но рассматривается как вероятное.

К *линейным дефектам* относятся цепочки точечных дефектов (вакансий или внедренных атомов) и дислокации, имеющие заметную протяженность только в одном направлении (до тысяч и даже десятков тысяч периодов решетки). Устойчивость и вероятность образования дефектов типа цепочки вакансий и внедренных атомов очень мала, и они распадаются на составляющие их точечные дефекты при наличии диффузии атомов. Дислокации являются более устойчивыми дефектами. Такие дефекты оказывают большое влияние на механические свойства твердых тел.

*Поверхностные дефекты* бывают двух типов: наружные и внутренние. *Наружные дефекты* — это несовершенства, обусловленные тем, что поверхность твердого тела граничит с другой фазой. Твердые тела обладают поверхностной энергией, для металлов она составляет  $1 \text{ Дж/м}^2$ .

*Внутренние дефекты* появляются в местах перехода от одной пространственной ориентации кристаллической решетки к другой. К внутренним поверхностным дефектам относятся:

- границы зерен, имеющие различную кристаллографическую ориентировку, состав или постоянную решетки;
- границы тонкой структуры (между блоками мозаики с незначительной разориентировкой, не превышающей  $1^\circ$ );
- границы двойников (разная ориентировка, удовлетворяющая особому условию симметричности);
- дефекты упаковки — одинаковая ориентировка, но иная последовательность чередования атомов (ошибки укладки).

Внутренние поверхности также обладают поверхностной энергией  $1 \text{ Дж/м}^2$ .

Поверхности оказывают сильное влияние на многие механические, электрические и оптические свойства твердого тела поскольку на них происходит скачкообразное изменение плотности материала, кристаллической структуры или локальной ориентации.

По аналогии с точечными, линейными и поверхностными дефектами следует отличать еще и группу объемных дефектов, к которым относятся скопления точечных дефектов типа пор, а также системы дислокаций, равномерно распределенных в объеме кристалла (зерна).

Основными нарушениями в строении атомной решетки реальных металлов являются *вакансии* и *дислокации*.

*Вакансии* имеются всегда и во всех кристаллах (зернах). Под действием тепловых флуктуаций в реальном кристалле они постоянно зарождаются и исчезают. При пластической деформации вакансии возникают как следствие сильных искажений решетки. Местом образования и скопления вакансий являются дислокации. По данным Зейтца [15] при пластической деформации, равной 10%, число вакансий в меди, алюминии, серебре достигает  $10^{18}$  на  $1 \text{ см}^3$ . Для вакансий характерна значительная неустойчивость, легкость смещения их в один из соседних узлов. Скорость движения вакансий составляет около  $10^{-7} \text{ см/с}$  (т.е. несколько межатомных расстояний). Вакансии могут объединяться в группы и колонии, создавая зародыш субмикроскопической полости — трещины. Они могут также образовывать «атмосферы» вокруг дислокаций, особенно при высоких температурах. Чем выше температура, тем больше вакансий в решетке и тем легче они перемещаются. В кристалле (зерне),

находящемся в условиях теплового равновесия, имеется конечное число вакансий, так как увеличение внутренней энергии благодаря наличию вакансий компенсируется приростом энтропии, обусловленным разупорядоченностью структуры.

Если обозначить через  $n_v$  число вакансий в металле, содержащем  $n_a$  атомов, то по законам термодинамики

$$\frac{n_v}{n_a} = C = e^{-\frac{E_v}{RT}} \quad (2.4)$$

где  $E_v$  — энергия, требуемая для образования вакансии;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура.

Отсюда видно, что при повышении температуры число вакансий быстро увеличивается и является равновесным при каждой температуре. Фактическое содержание вакансий может намного отличаться от равновесного значения. Если температура изменяется, смещая при этом и равновесное содержание, то может потребоваться много времени, чтобы число вакансий опять достигло равновесного значения. Избыток вакансий (для данной температуры) можно создать различными методами: резким охлаждением температуры (закалкой), сильной деформацией кристаллической решетки (ковкой, прокатыванием), бомбардировкой твердого тела атомами или частицами с высокой энергией (облучение в циклотроне или нейтронное облучение в ядерном реакторе). Образование и исчезновение вакансий в твердом теле приводит к изменению его плотности.

*Дислокации* — линейный дефект кристаллической решетки, нарушающий правильное чередование атомных плоскостей. Простейшими видами дислокаций являются краевая (дислокация Тейлора) и винтовая дислокации (Рис. 2.6).



Рис. 2.6. Схема строения кристалла, показанная в виде семейства атомных плоскостей: *а* — идеальный кристалл; *б* — кристалл с краевой дислокацией; *в* — с винтовой дислокацией

Характер дислокации определяется величиной и направлением вектора Бюргерса, равного вектору трансляции решетки. В краевой дислокации вектор Бюргерса направлен по нормали к линии дислокации и соответствует дополнительному межплоскостному расстоянию, связанному с «лишней» плоскостью. В винтовой дислокации вектор Бюргерса отвечает шагу спирали и

направлен параллельно линии дислокации. В общем случае дислокационная линия может представлять собой произвольную плоскую или пространственную кривую, вдоль которой вектор Бюргерса остается постоянным. Дислокация не может заканчиваться внутри кристалла (зерна). Она должна либо выходить на поверхность кристалла, либо замыкаться внутри его, образуя дислокационную петлю. Возможно окончание дислокационной линии в точке пересечения с другой дислокацией (в дислокационном узле).

Зарождение или наличие дислокаций в кристалле не приводит непосредственно к нарушению сплошности кристаллической решетки (образование свободной поверхности). Однако кристаллическая решетка вокруг дислокации упруго искажена, возникает локальная концентрация напряжений, которые по мере удаления от ядра дислокации постепенно убывают и становятся пренебрежимо малыми. Энергия дислокации обуславливается упругими деформациями кристалла при ее зарождении. Наличие дислокаций увеличивает энергию кристалла. Наряду с этим кристалл с дислокацией менее упорядочен и, следовательно, его энтропия больше чем идеального кристалла. Однако увеличение энтропии столь мало, что прирост свободной энергии благодаря накоплению энергии превышает ее убыль, обусловленную ростом энтропии.

Движение дислокаций может осуществляться скольжением или переползанием. Пересечение кристалла скользящей дислокацией приводит к сдвигу на величину вектора Бюргерса (Рис.2.7, *a—в*). Для перемещения дислокации в плоскости скольжения достаточно небольших напряжений (в металлах порядка  $10^{-4}$  модуля сдвига). В силу этого сдвиговая прочность реальных кристаллов, содержащих дислокации, на несколько порядков ниже сдвиговой прочности идеальных кристаллов.

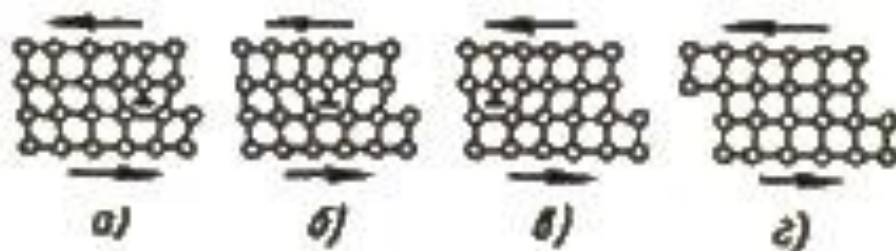


Рис. 2.7. Движение дислокаций скольжением

Перемещение краевой дислокации перпендикулярно плоскости скольжения (переползание) сопровождается укорачиванием или наращиванием «лишних» атомных плоскостей путем диффузионного перемещения вакансий или междоузельных атомов (Рис. 2.8).

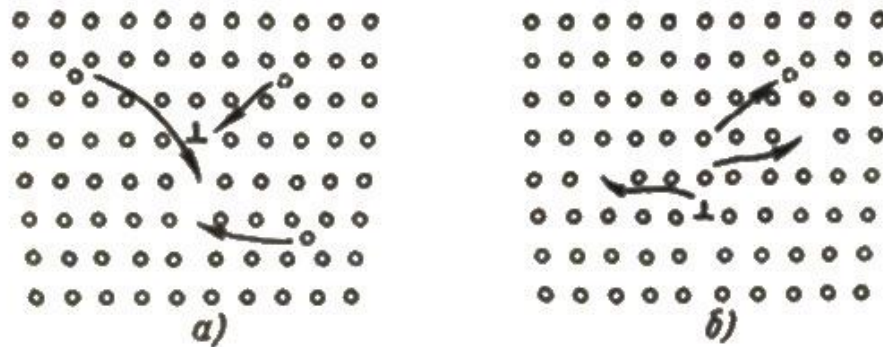


Рис. 2.8. Движение дислокаций переползанием с помощью добавления (а) или удаления (б) атомов из лишней атомной плоскости

Для движения и размножения дислокаций достаточно относительно малые напряжения. Чтобы создать в кристалле дислокации в количестве, необходимом для протекания пластической деформации, и компенсировать потерю дислокаций вследствие выхода их на поверхность и аннигиляции внутри кристалла, должны работать источники дислокаций. Критическое скалывающее напряжение, необходимое для действия источника, находящегося внутри кристалла, равно

$$\sigma_{кр} = 2Gb/l, \quad (2.5)$$

где  $G$  — модуль сдвига;  $b$  — вектор Бюргерса;  $l$  — длина источника. Длина  $l$ , отвечающая значениям критического скалывающего напряжения в кристаллах, имеет порядок  $10^{-4}$  см.

Полагают, что из одного источника может образоваться до 1000 новых дислокаций. С увеличением количества дислокаций в кристаллах свободная энергия  $U$  возрастает как за счет свободной энергии, вносимой каждой отдельной дислокацией, так и за счет упругого взаимодействия дислокаций между собой и с другими дефектами кристалла.

Движение дислокаций в деформируемом материале способно породить в больших количествах дислоцированные атомы и вакансии. Точечные дефекты вызывают искажения решетки и повышают свободную энергию кристалла.

Для обнаружения дислокаций применяют следующие методы:

- травление, выявляющее ямки, которые представляют собой места выхода линейных дефектов из кристаллов;
- декорирование дислокаций в кристаллах кремния и в галоидных соединениях щелочных металлов;

- электронноскопическое просвечивание металлической фольги, позволяющее наблюдать перемещение отдельных дислокаций под напряжением, возникающим вследствие нагревания электронным пучком;
- рентгеновская дифракция, дающая возможность фотографировать положение отдельных дислокаций в кристалле металлов;
- ионный микропроектор, обеспечивающий наблюдение атомной структуры поверхности кристаллов.

Методы прямого исследования дислокаций подробно рассмотрены в работе [4].

Общая длина всех линий дислокаций в единице объема кристалла называется *плотностью дислокаций* и определяется по формуле

$$\rho = \frac{L}{v}, \text{ см}^{-2} \quad (2.6)$$

где  $L$  — общая длина линий дислокаций в кристалле;  $v$  — объем кристалла.

Плотность дислокаций непосредственно зависит от степени деформации металла. При этом число дислокаций не зависит от температуры (они атермичны). В отличие от вакансий, число которых в состоянии равновесия достаточно велико (пропорционально значению функции распределения Больцмана  $\exp(-E_v/RT)$ ), плотность дислокаций в твердых телах в состоянии равновесия может быть принята близкой к нулю.

### 2.3.3 Зависимость сопротивления деформированию и разрушению от числа искажений в кристаллической решетке.

Атомная решетка реального кристаллического тела имеет разнообразные искажения (дефекты), оказывающие влияние на его прочность. К таким дефектам кристаллического строения металлов и сплавов относятся вакансии, атомы примесей, дислокации, границы зерен и блоков мозаики и микродефекты структуры. Решающая роль в процессах пластической деформации и разрушения принадлежит *дислокациям*.

Тейлор впервые установил функциональную зависимость между приложенным напряжением сдвига и расстоянием между краевыми дислокациями с учетом их знака и распределения [2]. Для случая, когда все дислокации в кристалле параллельны и распределены в виде равномерно чередующихся рядов дислокаций разных знаков, уравнение имеет вид

$$S = G\lambda d^{-1} - F \quad (2.7)$$

где  $G$  — модуль сдвига;  $\lambda$  — постоянная решетки;  $F$  — коэффициент, характеризующий распределение дислокаций;  $d$  — расстояние между дислокациями в рядах.

Согласно уравнению (1.6) сопротивление деформации монотонно возрастает с уменьшением расстояния между дислокациями в рядах, т.е. чем больше сближены дислокации, тем сильнее их взаимодействие и тем больше сопротивление сдвигу кристалла. Тейлор также полагал, что совершенный кристалл способен противостоять очень большому напряжению.

Идея о зависимости прочности от несовершенств строения кристалла получила свое дальнейшее развитие в работах А. И. Одингга с сотрудниками. Ими предложены схемы зависимости сопротивлений деформированию (прочности) от количества искажений в решетке. Характер изменения кривой прочности от числа дефектов кристаллического строения схематически показан на рис. 2.9.

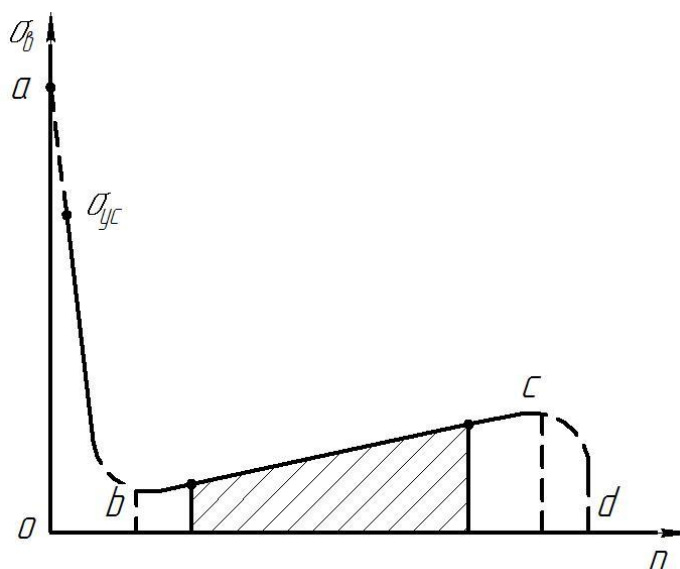


Рис. 2.9. Зависимость прочности от числа несовершенств в кристаллической решетке металлов и сплавов

На этой кривой прочности можно выделить следующие четыре участка.

Начальный участок  $Oa$  представляет прочность кристалла без дефектов, так называемую теоретическую прочность идеальной кристаллической решетки, в которой все атомы одновременно воспринимают действие нагрузки ( $\sigma_{yc}$  — прочность монокристаллических усов). Участок кривой прочности  $ab$  соответствует разупрочнению металла и его сплавов в результате возникновения ограниченного числа дефектов в кристаллическом строении их. Участок  $bc$  представляет упрочнение металлов и сплавов вследствие дальнейшего увеличения числа несовершенств в кристаллической структуре. С увеличением

плотности дислокаций уменьшается расстояние между дислокациями, а это приводит к усилению взаимодействия дислокаций между собой и с другими дефектами решетки. При этом сопротивление движению дислокаций возрастает, а следовательно, возрастает и сопротивление деформации, прочность металла увеличивается (происходит упрочнение). Поскольку дислокациям принадлежит решающая роль в процессах пластической деформации и разрушения, некоторые исследователи считают, что участок кривой *bc* лежит в интервале плотностей дислокаций (приблизительно) от  $10^4$ — $10^8$  до  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

Участок *cd* соответствует предельному насыщению дефектами кристаллической решетки, при котором происходит потеря несущей способности материала. Металл в этом состоянии имеет чрезвычайно большую плотность дислокаций. Предельная плотность дислокаций, способная вызывать разрушение кристалла, составляет  $10^{14}$ — $10^{15}$  см<sup>-2</sup> (при равномерном распределении по всему объему). Более высокие средние плотности дислокаций в кристаллах не наблюдаются.

#### **2.3.4. Критерии и методы прогнозирования прочности деталей.**

Разработка критериев прочности материалов является одной из решающих проблем в науке о прочности, направленной на поиск эффективных способов и методов оценки несущей способности и долговечности твердых тел, используемых в качестве конструкционных материалов. Существующие критерии прочности подразделяются на две группы: предельные (силовые, деформационные, энергетические) и кинетические.

Научную основу *предельных критериев* составляют механика сплошных сред и теория предельных состояний. Наиболее ранними из них, ставшими классическими в теории сопротивления материалов являются *силовые критерии*. Несмотря на то, что подобные критерии не раскрывают физической сущности процесса разрушения, следует признать, что на протяжении многих лет эти простые и доступные в инженерной практике критерии играли колоссальную роль во всех отраслях машиностроения. В некотором приближении механические критерии дают относительно простые, проверенные опытом и временем соотношения для прочностных расчетов.

Поскольку материалы обладают ограниченной способностью к пластическим деформациям, один из подходов к разработке предельных критериев прочности был основан на связи разрушения твёрдых тел со степенью его неупругой деформации, прирастающей от цикла к циклу их силового нагружения, до некоторой критической величины. Этот подход предопределил появление *деформационных критериев*, связывающих закономерности усталостной повреждаемости и разрушения с циклическими деформациями.

Деформационные критерии по современным представлениям основаны на утверждении, что пластическая деформация всегда предшествует разрушению и подготавливает его, а величина суммарной деформации материала однозначно коррелирует с его повреждаемостью [5,6]. В этом случае долговечность материалов связывается с некоторым ресурсом пластичности.

Обоснованию силовых энергетических критериев посвящены исследования В.В. Федорова [7], который на основе развиваемой им термодинамической теории прочности предложил в качестве критерия прочности материалов использовать изменение плотности внутренней энергии при ударных испытаниях образцов как отношение работы разрушения  $A$  к деформированному объему  $V$ , полагая при этом, что при высокоскоростной деформации процессы в деформируемых объемах будут приближены к адиабатическим.

$$\Delta u_x = a_v = \frac{A}{V}, \quad (2.8)$$

где  $a_v$  -ударная вязкость.

В этой работе он впервые показал, что плотность внутренней энергии является однозначной и интегральной характеристикой термодинамического состояния материала поверхностного слоя.

Анализируя и обобщая опыт разработки и исследования различных предельных критериев прочности можно отметить, что несмотря на их широкую применяемость для прогнозирования эксплуатационных свойств деталей объективную картину устойчивости материала к действующей постоянно или периодически в течение определенного времени совокупности разрушающих факторов они дать не могут.

В работах [1,8,9] показано, что для усталостного разрушения наибольшей информативностью обладают *кинетические критерии*, в которых фактор времени отражает кинетику накопления повреждаемости материалов. В качестве меры накопленной повреждаемости могут рассматриваться приращения запасенной энергии, плотности дефектов и других показателей состояния материалов, позволяющих прогнозировать выработанный и остаточный ресурс элементов машин и оборудования, что необходимо для решения задачи управления сроком их службы.

### **2.3.5 Энергетическая модель повреждаемости и разрушения поверхностных слоёв при эксплуатации.**

Любой процесс деформирования и разрушения является кинетическим и необратимым процессом независимо от физико-химической природы материала, его структуры, а также условий нагружения.

Корректность представления процесса деформирования и разрушения как кинетического вытекает из двух экспериментально установленных фактов, из которых первый свидетельствует и его статистическом характере, второй – раскрывает его феноменологическую сторону.

В основе феноменологичности процесса лежит зависимость повреждаемости элемента поверхностного слоя от силовых параметров нагружения и времени (циклов) их воздействия (Рис.2.10), из которой следует, что если два процесса, сопровождающихся внутренней повреждаемостью элемента поверхности, протекают как при более высоких внешних силовых параметрах нагружения, так и при более низких, то разница в поведении деформируемого элемента поверхностного слоя будет зависеть только от интенсивности повреждаемости.

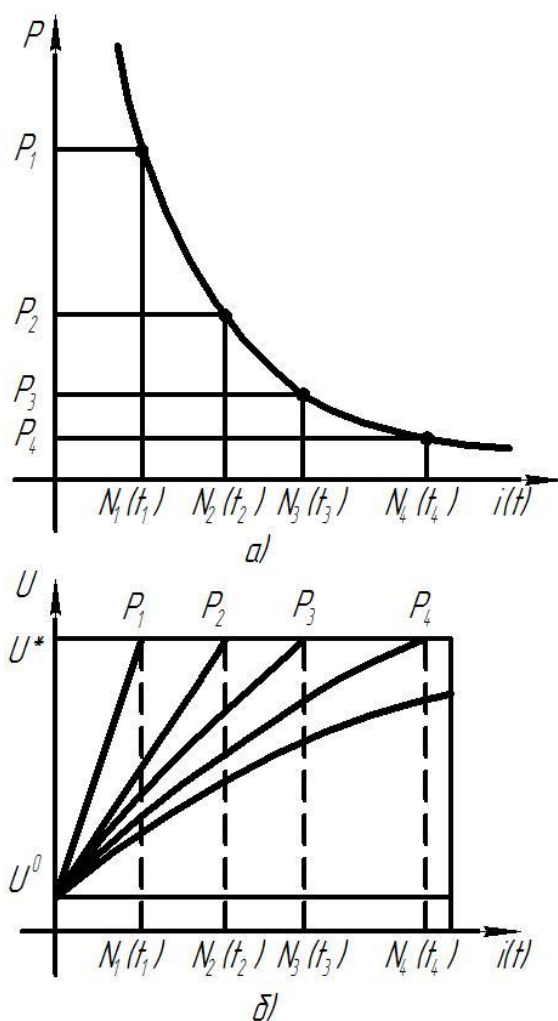


Рис. 2.10. Кинетика процесса деформирования и разрушения .

Статистически процесс деформирования и разрушения выглядит следующим образом. В каждый момент времени (цикл) деформирования

элемента поверхностного слоя заданным условиям нагружения соответствует определенная степень его повреждаемости. Как только повреждаемость материала в локальном микрообъеме достигает предельной (критической) величины, начинается процесс его разрушения в виде микро- и макронарушений. Подтверждением этого являются результаты экспериментальных исследований влияния продолжительности контактного взаимодействия на усталостную прочность и износостойкость деталей, которые показали, что с появлением в поверхностном слое признаков разрушения (микротрещины) эксплуатационные показатели деталей начинают снижаться. Это позволило сделать вывод, что наибольший эксплуатационный эффект достигается за промежуток времени или циклов нагружения, при котором в элементах поверхностного слоя накапливается критическая (предельная) поврежденность.

Изложенные выше представления и закономерности процесса деформирования и разрушения могут быть описаны и проиллюстрированы следующим образом. Обозначим через  $U$  количественную меру поврежденности элемента поверхностного слоя, через  $u$  - степень поврежденности, а через  $\dot{U} = \frac{du}{dt}$  интенсивность повреждаемости. Тогда при любой величине усилия внешнего силового нагружения поврежденность элемента поверхностного слоя будет изменяться с интенсивностью, которая в общем случае будет являться функцией силового параметра деформирования  $P$ , температуры  $T$  и времени  $t$  протекания процесса. Графически это можно представить в виде кинетических кривых (Рис.2.10б), из которых следует, что по мере деформирования элемента поверхностного слоя его поврежденность увеличивается. Это увеличение происходит до тех пор, пока поврежденность  $U$  не достигает критической величины  $U^*$ , зависящей от свойств обрабатываемого материала и не зависящей от величины силового нагружения. Последнее обстоятельство обусловлено феноменологичностью процессов деформирования и разрушения материалов. На Рис.2.10а представлена зависимость изменения числа циклов нагружения элемента поверхностного слоя  $i$  в зависимости от силовых параметров процесса  $P$ , при которых достигается его критическая поврежденность. Аналогичные кривые могут быть построены для любого уровня поврежденности  $U < U^*$ . Таким образом условие предельной поврежденности элемента поверхностного слоя имеет вид:

$$U = U_0 + \int_0^{i^*} \dot{U} dt = U^* = const, \quad (2.9)$$

где  $U_0$  - поврежденность элемента поверхностного слоя на стадии обработки, предшествующей условиям эксплуатации детали;  $t^*$  - предельное время эксплуатации детали эквивалентное предельному числу циклов внешнего силового нагружения.

Принимая, что поврежденность деформируемых в процессе эксплуатации детали объемов при каждом цикле носит необратимый характер, а степень повреждаемости есть результат накопления (суммирования) поврежденностей, можно сделать вывод, что предельная поврежденность и, как следствие, разрушение поверхностного слоя произойдет тогда, когда сумма относительных повреждений станет равной 1, т.е.

$$W = \frac{1}{U^*} \int_0^{t^*} U(t) dt = 1 \quad (2.10)$$

Это условие позволяет прогнозировать предельное время эксплуатации детали, для различных видов и режимов силового нагружения поверхностных слоёв при условии знания зависимости  $U_1(P, T, t(i))$ .

### **2.3.6 Физико-химическое воздействие внешней среды на механические свойства поверхностного слоя металлов и сплавов.**

Поверхность металла обладает повышенной химической активностью и в реальных условиях неизбежно адсорбирует атомы элементов окружающей среды, покрываясь слоями адсорбированных газов, паров воды и жиров. Слой жира достигает нескольких сот микрон, пленка водяных паров составляет 50—100 слоев молекул. Жировые пленки прочно связаны с поверхностью металла и полностью не удаляются обычными механическими и химическими средствами. После промывки деталей керосином и бензином на поверхности остается слой жиров в 1—5 мкм. Очень тщательной очисткой можно довести толщину слоя жиров до 0,1—0,001 мкм (примерно 100 — 10 рядов молекул). Воздействие внешней среды приводит к образованию на поверхности металла различных соединений, прежде всего различных окислов. Они быстро возникают в результате влияния атмосферного кислорода. Толщина наружной пленки в окисляющихся металлах равна примерно 20—100 Å (10—20 слоев молекул). Например, окисная пленка в стали равна 10—20 Å, а алюминии — 100—150 Å.

В результате диффузии в поверхностном слое могут возникнуть химические и иные соединения основного материала с проникающими извне веществами. Диффузионная подвижность атомов может привести к перераспределению концентрации легирующих элементов, способствуя этим в отдельных случаях обеднению поверхностного слоя некоторыми легирующими элементами (обезуглероживание поверхностных слоев в сталях и обеднение

поверхностного слоя хрома и алюминия в жаропрочных никелевых сплавах при высоких температурах и др.).

Химико-физическое взаимодействие поверхности металла с окружающей средой на отдельных участках поверхности неравномерно вследствие:

- различной адсорбционной активности у разных элементов кристалла (ребра, плоскости, впадины);
- различных физико-химических свойств поверхности поликристаллических тел, образованных из множества зерен, выходящих наружу разными кристаллографическими плоскостями;
- неодинакового состава поверхностных зерен (зерна разных фазовых состояний).

Значительное влияние на физико-химическую активность отдельных поверхностных зерен оказывает величина их остаточных напряжений (микронапряжения), степень пластической деформации и др.

Исследованиями академика П. А. Ребиндера и его учеников установлено значительное влияние на прочность металлов расклинивающего действия адсорбированных пленок жидкостей в поверхностных трещинах металлов (эффект Ребиндера). Молекулы некоторых адсорбированных на поверхности веществ обладают высокой активностью. Распространяясь по поверхности, они попадают в микротрещины, в глубине которых производят сильное расклинивающее действие, равноценное действию дополнительно приложенного к телу растягивающего усилия. Следствием такого дополнительного воздействия на металл является снижение его прочности, облегчение деформации. Чем щель уже, тем сильнее расклинивающее действие адсорбированных пленок (ширина щели не более 0,1 мкм).

Адсорбционные эффекты в процессах деформации и разрушения металлов могут быть особенно велики. Применение активных смазочно-охлаждающих технологических сред при обработке резанием облегчает пластическую деформацию и способствует улучшению качества обработанной поверхности (снижение шероховатости и поверхностного наклепа).

Эффект адсорбционного понижения прочности особенно заметно проявляется в условиях действия знакопеременных нагрузок. При циклическом нагружении происходит расклинивание поверхностных микрощелей. При этом адсорбированные слои выдавливаются из микрощелей, но не полностью; оставшееся адсорбирующее вещество мешает полному смыканию микротрещины. Последовательное раскрытие и смыкание приводит к росту трещин и к разрыхлению поверхностного слоя. Сопротивление усталости металла в поверхностно-активных средах резко снижается (адсорбционная усталость).

Адсорбция, как правило, уменьшается с повышением температуры. Это объясняется тем, что тепловые колебания атомов могут привести к десорбции адсорбированной молекулы; вероятность такого отрыва растет с увеличением температуры.

Адсорбция возможна не только на поверхности металла, но и внутри его, когда примеси, растворенные в твердом теле, адсорбируются на внутренних поверхностях, это чаще всего происходит по границам зерен или каких-либо дефектов структуры. Внутренняя адсорбция может также играть важную роль в процессах адсорбционного понижения прочности металлов.

Поверхность, особенно трещины и выходящие наружу межзеренные граничные прослойки, являются как бы воротами для диффузионного проникновения чужеродных атомов в металл детали. Диффузия через поверхность оказывает сильное влияние на свойства металлов вообще и их поверхностных слоев особенно. Это имеет важное значение как в процессе изготовления деталей (методы обработки с высокой температурой в зоне разрушения, например, шлифование, электроимпульсная и ультразвуковая обработка и др., термохимическое поверхностное упрочнение, например, цементация, азотирование), так и при эксплуатации деталей с сильно развитыми поверхностями (лопатки турбин, жаровые трубы камер сгорания и др.) в условиях высоких температур и газовой среды.

### **2.3.7 Физическая модель изнашивания поверхности**

Как уже указывалось, *трение (внешнее трение)* – сопротивление относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зоне соприкосновения поверхностей по касательной к ним и сопровождаемое рассеянием энергии. *Сила трения* количественно характеризует трение контактирующих тел. Сила трения, как и всякая сила – вектор и при движении направлена противоположно скорости, тангенциально к общей границе. По характеру относительного движения различают трение покоя (до перехода к относительному движению) и трение движения – скольжения или качения (рис.2.11). При трении скольжения скорости тел в точке касания различны, а при трении качения – одинаковы.

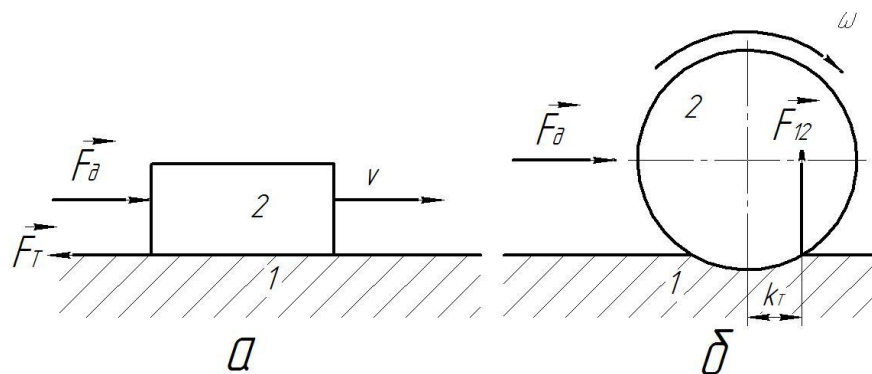


Рис.2.11. Силы трения: *а* – скольжения, *б* – качения

Различают трение внешнее (между телами) и внутреннее (между частицами твёрдых тел, а также в газах и жидкостях). Силы внешнего трения сильно зависят от шероховатости контактирующих поверхностей (рис. 2.12, *а*).

Силы трения сильно отличаются при отсутствии или наличии между телами смазочного материала – либо вязкой жидкости, предварительно помещённой между телами, либо газа, подаваемого в зону контакта под давлением. Смазочный материал производит смазку – действие, состоящее в уменьшении силы трения и износа за счёт разделения поверхностей трения. Смазочный материал разделяет контактирующие поверхности (рис. 2.12, *б*).

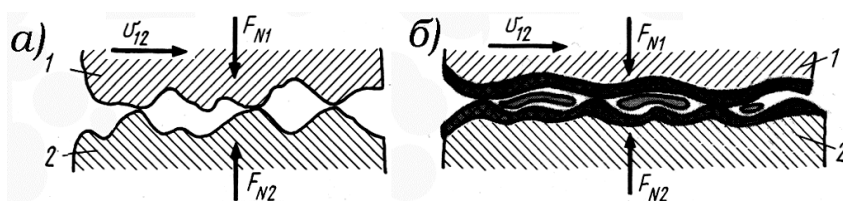


Рис.2.12. Виды трения: *а* – сухое, *б* – со смазкой

Если поверхности разделены смазочным материалом полностью, то силу трения вычисляют по формуле Ньютона. Такое трение называют вязким или жидкостным.

$$F_T = \mu A v / h, \quad (2.11)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость смазочного материала;  $A$  – площадь поверхности скольжения;  $v$  – относительная скорость скольжения тел;  $h$  – толщина слоя смазочного материала.

Силу сухого трения скольжения находят по закону Амонтона-Кулона:

$$F_T = f \cdot F_N, \quad (2.12)$$

где  $f$  – коэффициент трения,  $F_N$  – сила нормального давления.

Трение качения, хотя и существенно ниже, но всё же существует, потому, что реальные тела не абсолютно твёрдые, а деформируются и возникает не

точка, а площадка контакта (рис. 2.11,б). В этой площадке – зоне контакта возникает реактивный момент, препятствующий качению. Для качения катка нужна движущая сила  $F_{\partial}$ . Точка приложения реакции  $F_{12}$  смещена вперёд, в сторону качения на расстояние  $k_T$ , которую и называют коэффициентом трения качения. Величина коэффициента трения качения фактически характеризует деформируемость колеса и опорной поверхности. Нетрудно догадаться, что этот коэффициент имеет размерность длины. Из уравнения равновесия моментов всех сил относительно "точки контакта"  $B$  следует, что

$$F_{\partial} \cdot R = F_{12} \cdot k_T, \quad (2.13)$$

а момент сил трения качения

$$M_T = F_{12} \cdot k_T. \quad (2.14)$$

Помимо трения в контакте поверхностей, существует ещё и трение в материале деталей, обусловленное контактом частиц и молекул материала. При этом также расходуется работа внешних сил и выделяется теплота.

У конструкционных металлов внутреннее трение очень мало и при расчёте металлических деталей его не учитывают. Однако у высокомолекулярных материалов (резины, пластмасс) внутреннее трение почти на два порядка выше, поэтому оно должно учитываться при их расчёте. Внутреннее трение в материале деталей используется, в основном, для снижения шумов и вибрации путём замены металлических деталей пластмассовыми и композитными, где велико трение между частицами структуры материала.

При трении и изнашивании наблюдаются следующие явления:

- *схватывание* – местное соединение твёрдых тел под действием молекулярных сил;
- *выкрашивание* – отделение частиц материала при усталостном изнашивании с образованием ямок на поверхности трения (особенно часто у высших кинематических пар);
- *заедание* – результат схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной детали на другую;
- *приработка* – изменение геометрии и свойств поверхностей в начальный период, при постоянных внешних условиях с уменьшением силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

При скольжении перед микронеровностью возникает лобовой валик деформируемого материала (рис.2.13), который находится под воздействием сжимающих напряжений. За микронеровностью вследствие сил трения материал растягивается. Следовательно, материал микронеровностей испытывает знакопеременное нагружение, которое приводит к отделению частиц материала.

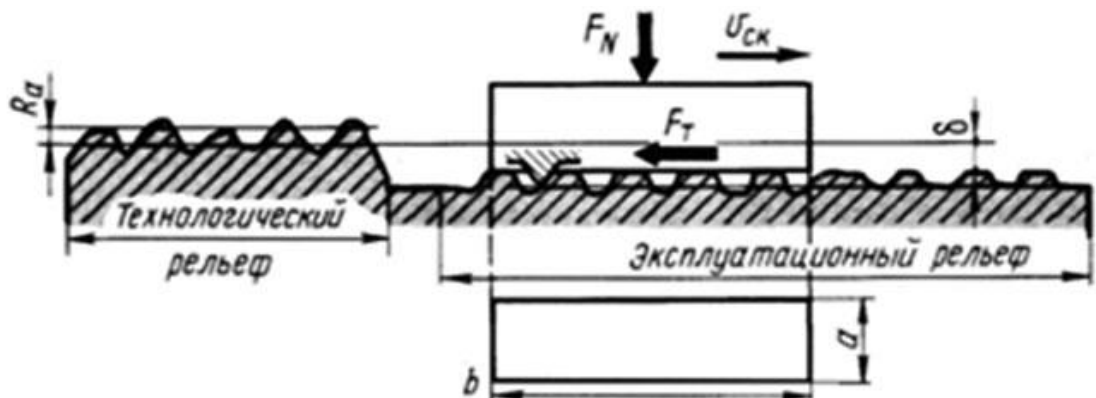


Рис. 2.13. Физическая модель изнашивания поверхности

Материал разрушается не сразу, а после некоторого числа циклов работы  $n_{ц}$ .

На первой стадии исходный технологический микрорельеф, полученный при изготовлении (высота неровностей обычно до 100...200 мкм), превращается в некий рельеф с меньшей шероховатостью (0,05...0,1 мкм), которая в дальнейшем, на второй стадии существенно не меняется. Для уменьшения времени приработки следует назначать при изготовлении детали такой вид обработки поверхности, которая ближе всего к равновесной шероховатости.

Наконец, рано или поздно, наступает предельный износ, соответствующий предельному состоянию детали. При этом речь идёт уже о катастрофическом изменении размеров и формы детали, приводящему к предельному состоянию, когда дальнейшая эксплуатация невозможна.

Большое число факторов, влияющих на изнашивание, затрудняет создание обоснованных методов расчета износостойкости деталей машин. Приблизительно сопротивление изнашиванию оценивают, в частности, сопоставлением расчетных давлений с допускаемыми значениями, установленными на основе опыта эксплуатации конструкции. Инженерные расчёты по износу кинематических пар выполняют по интегральным характеристикам: скорости и интенсивности изнашивания. Расчеты деталей на износ заключается либо в определении условий, обеспечивающих их жидкостное трение, либо в определении достаточной долговечности их путем назначения для трущихся поверхностей давлений  $p$  не более допускаемых  $[p]$ :  $p \leq [p]$ .

Расчёт износа деталей машин при упругом, пластическом контакте и микрорезании поверхностей трения должен учитывать давление на поверхности трения, относительную скорость и время работы узла.

### 2.3.8 Физика процесса и виды усталостной повреждаемости и разрушения деталей машин при циклических нагрузках.

Для раскрытия физической природы процесса усталостного разрушения в

качестве примера рассмотрим ось вагона, вращающуюся вместе с колесами (рис. 2.14, а), испытывающую циклически изменяющиеся напряжения, хотя внешние силы и являются постоянными величинами. Происходит это в результате того, что части вращающейся оси оказываются попеременно то в растянутой, то в сжатой зонах.

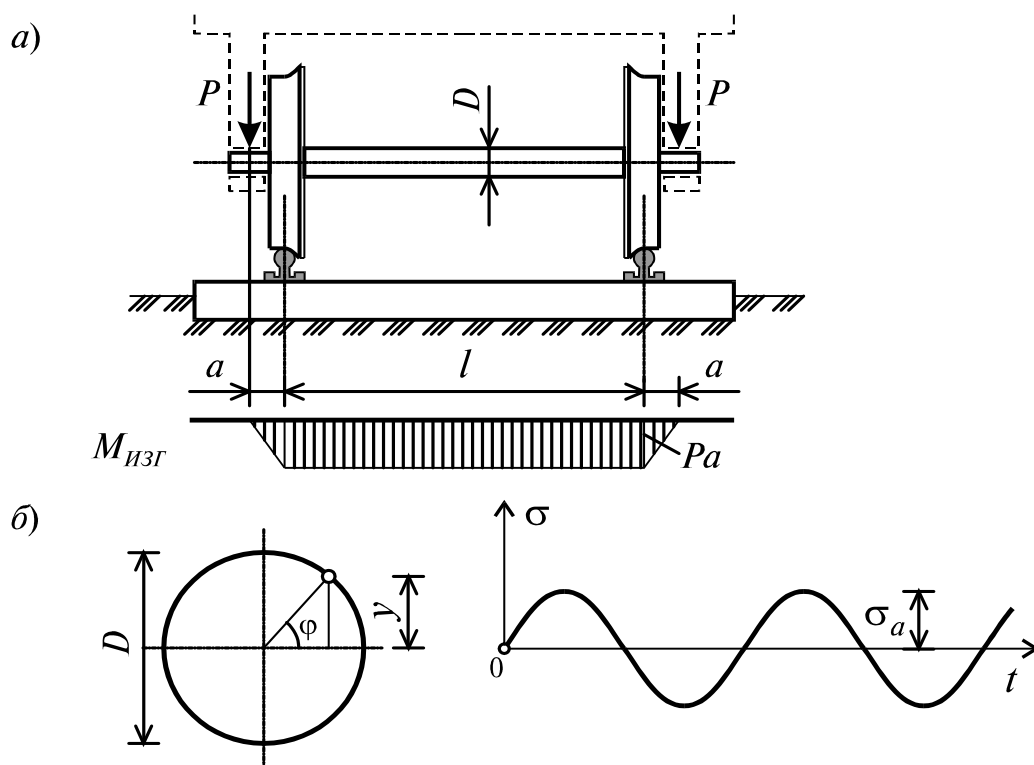


Рис. 2.14. Ось вагона, вращающаяся вместе с колесами: схемы нагружения и эпюры

Сделав необходимые математические построения, получим, что, нормальное напряжение  $\sigma$  в сечениях оси меняется по синусоиде с амплитудой (рис. 2.14,б):

$$\sigma_a = \frac{PaD}{2I_x} \quad (2.16)$$

Опыт показывает, что при переменных напряжениях после некоторого числа циклов может наступить разрушение детали, в то время как при том же неизменном во времени напряжении  $\sigma_a$  разрушения не происходит. Число циклов до момента разрушения зависит от величины  $\sigma_a$  и меняется в весьма широких пределах. При больших напряжениях для разрушения бывает достаточно 5—10 циклов. Это хорошо видно хотя бы на примере многократного изгиба куска медной проволоки (рис. 2.15). При меньших напряжениях деталь

выдерживает миллионы и миллиарды циклов, а при еще меньших — способна работать практически неограниченно долго.

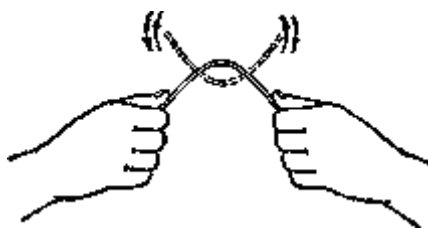


Рис. 2.15. Пример знакопеременных нагрузок, приложенных к медной проволоке, с последующим усталостным разрушением

Опыты показывают, что детали длительное время подвергавшиеся действию переменных напряжений, разрушаются при напряжениях, значительно меньших, чем временное сопротивление  $\sigma_s$  (иначе предел прочности). Разрушение при циклическом нагружении происходит вследствие возникновения микротрещин в зоне концентрации напряжений. Трещины постепенно развиваются, проникая вглубь, поперечное сечение деталей ослабляется и в некоторый момент происходит мгновенное разрушение. Усталость охватывает две значительно отличающиеся друг от друга области циклического нагружения и деформирования. В первом случае при циклическом нагружении возникают значительные пластические деформации. Эта область называется малоцикловой усталостью, и число циклов не превышает  $10^4 \dots 10^5$ . Другая область – циклическое нагружение, при котором деформация во время каждого цикла в значительной степени упруга. Для этой области характерны малые напряжения (нагрузки) и большое число циклов до разрушения. Эта область называется многоцикловой усталостью и характеризуется долговечностью более  $10^6 \dots 10^7$  циклов.

На рис. 2.16 показано разрушение вала малоуглеродистой пластичной стали по версии проф. Дж. Коллинза, где 1 – начало разрушения, 2 – шероховатая поверхность, 3 – гладкая поверхность, 4 – радиальные усы, 5 – область среза; а – малая относительная скорость роста трещины; b – большая относительная скорость распространения трещины; с – конечная стадия разрушения.

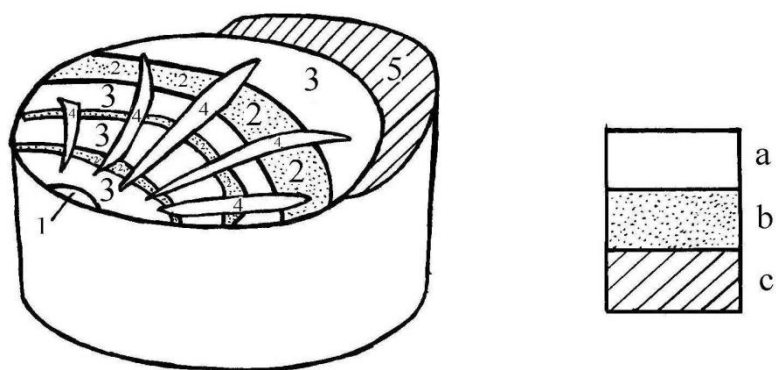


Рис. 2.16. Разрушение вала из малоуглеродистой стали

На рис. 2.17 представлен усталостный излом шейки коленчатого вала по трактовке проф. В. П. Когаева.

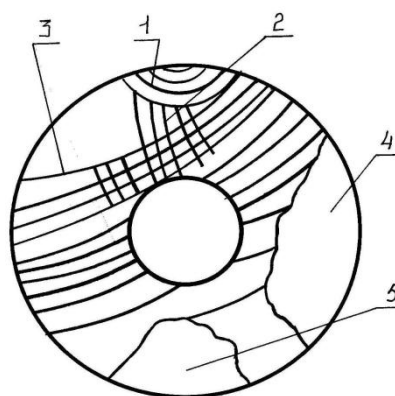


Рис. 2.17. Усталостный излом шейки коленчатого вала

На усталостном изломе шейки коленвала можно выделить пять зон (рис. 2.17): 1 – локальная зона, в которой возникает начальная микроскопическая трещина усталости. Место, где начинается ее развитие, называется фокусом излома. Малую зону, прилегающую к фокусу излома и соответствующую начальной макроскопической трещине усталости, называют очагом разрушения. При больших уровнях переменных напряжений могут быть несколько фокусов и очагов разрушения. Чаще всего фокус и очаг разрушения располагаются у поверхности детали, где возникают наибольшие напряжения. Далее образуются ступеньки и рубцы 2, при слиянии параллельных трещин, развивающихся из нескольких очагов. На изломе на участке развития трещины видны усталостные линии 3, являющиеся следами фронта продвижения трещины с гладкой блестящей поверхностью. После распространения усталостной трещины на большую часть поперечного сечения происходит ускоренное развитие трещины 4 и долом 5. Зона долома 5 носит характер хрупкого разрушения и имеет шероховатую поверхность.

Таким образом, усталость является одним из видов разрушения с переменными амплитудами напряжений при эксплуатации машин со случайным

спектром нагружения. Кривые усталости строятся при постоянной амплитуде напряжения для каждой точки, поэтому конструктору необходимо иметь теорию или гипотезу, подтвержденную экспериментально.

Принято считать, что процесс усталостного разрушения состоит из трех фаз. Первая фаза – возникновение трещины, вторая – распространение трещины и, наконец, трещина достигнет критического размера и процесс разрушения завершает третья фаза – быстрый неустойчивый рост трещины до полного разрушения. После разрушения на поверхности излома детали обнаруживаются обычно две ярко выраженные зоны. В одной зоне кристаллы различаются невооруженным глазом с большим трудом. Поверхность излома имеет сглаженные очертания. В другой зоне явно выступают признаки свежего хрупкого разрушения. Кристаллы имеют острую огранку и блестящую чистую поверхность.

В настоящее время установлено, что структура металла при циклических нагрузках не меняется. Начало разрушения носит чисто местный характер и во многом связан с неоднородностью реальной структуры материалов (различие размеров, очертаний, ориентации соседних зерен металла; наличие различных включений – шлаков, примесей; дефекты кристаллической решетки, дефекты поверхности материала – царапины, коррозия и т. д.). В связи с указанной неоднородностью при переменных напряжениях на границах отдельных включений и вблизи микроскопических пустот и различных дефектов возникает концентрация напряжений, которая приводит к микропластическим деформациям сдвига некоторых зерен металла (при этом на поверхности зерен могут появляться полосы скольжения) и накоплению сдвигов (которое на некоторых материалах проявляется в виде микроскопических бугорков и впадинок – экструзий и интрузий); затем происходит развитие сдвигов в микротрещины, их рост и слияние; на последнем этапе появляется одна или несколько макротрещин, которая достаточно интенсивно развивается (растет). Края трещины под действием переменной нагрузки притираются друг об друга, и поэтому зона роста трещины отличается гладкой (полированной) поверхностью. По мере роста трещины поперечное сечение детали все больше ослабляется, и, наконец, происходит внезапное хрупкое разрушение детали, при этом зона хрупкого долома имеет грубозернистую кристаллическую структуру (как при хрупком разрушении).

В настоящее время, физические основы теории твердого тела не находятся еще на такой стадии развития, чтобы на их базе можно было бы создать методы расчета на усталостную прочность, удовлетворяющие запросам практики. Поэтому идут по пути накопления экспериментальных фактов, из совокупности которых можно было бы выбрать подходящие правила как руководство для

расчета. Объединение и систематика экспериментальных данных и представляет собой в настоящее время содержание теории усталостной прочности. В результате полученные экспериментальные зависимости не являются универсальными, а сами расчеты дают сравнительно невысокую точность.

В условиях циклических напряжений механические характеристики материала определяются путем специальных испытаний. Наиболее распространенными являются испытания в условиях симметричного цикла. При этом обычно используется принцип чистого изгиба вращающегося образца (рис.2.18).

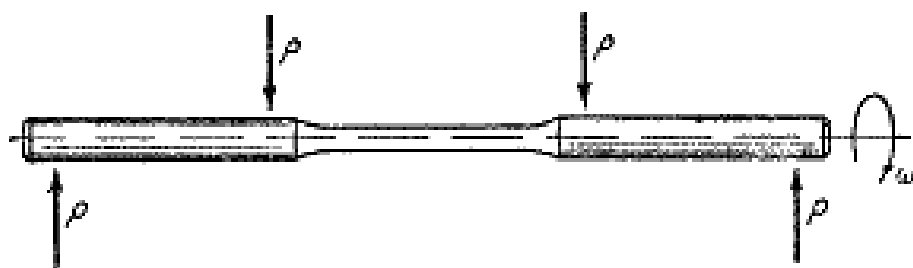


Рис.2.18. Образец для усталостных испытаний

Для испытаний в условиях несимметричных циклов используются либо специальные машины, либо же вводятся дополнительные приспособления. Так, например, можно на испытуемом образце установить пружину, создающую постоянное растяжение образца с напряжением  $\sigma_m$ . Во время испытания на это напряжение накладывается напряжение от изгиба, меняющееся по симметричному циклу. Путем многократных испытаний можно определить число циклов, которое выдерживает материал до разрушения, в зависимости от величины  $\sigma_{max}$  цикла. Эта зависимость имеет вид кривой, показанной на рис.2.19 и называется диаграммой усталостного разрушения Велера. В связи с тем, что число циклов с уменьшением  $\sigma_{max}$  возрастает в высокой степени, предпочитают в ряде случаев по оси абсцисс откладывать не число  $N$ , а его логарифм.

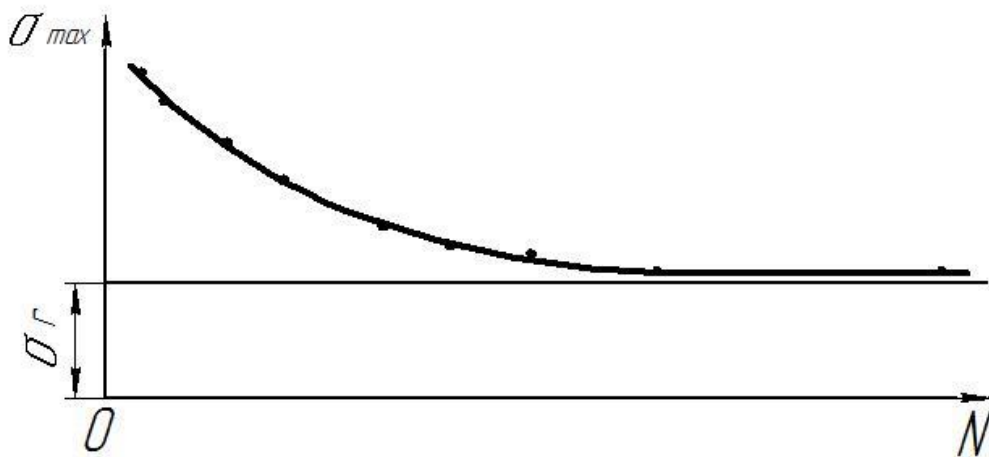


Рис.2.19. Диаграмма усталостного разрушения Велера

Опыт показывает, что для большинства черных металлов можно указать такое наибольшее максимальное напряжение, при котором материал не разрушается при любом числе циклов. Такое напряжение называется *пределом усталости*, или *пределом выносливости*. Предел выносливости обозначается через  $\sigma_r$ , где индекс  $r$  соответствует коэффициенту цикла (для симметричного цикла обозначение предела выносливости -  $\sigma_{-1}$ , для пульсирующего -  $\sigma_0$  или  $\sigma_{\pm\infty}$  и т. д. ). Для цветных металлов и для закаленных до высокой твердости сталей вводится понятие условного предела выносливости, в качестве которого принимается напряжение, при котором образец способен выдержать  $10^8$  циклов.

Определение предела выносливости является трудоемкой операцией, поэтому был сделан ряд попыток связать эмпирическими формулами предел выносливости с известными механическими характеристиками материала. Обычно считается, что для сталей предел выносливости при изгибе составляет половину от предела прочности:

$$\sigma_{-1} \approx (0,4 \div 0,5) \sigma_{\text{ср}} \quad (2.17)$$

Для высокопрочных сталей можно принять:

$$\sigma_{-1} \approx 4000 + \frac{1}{6} \sigma_{\text{ср}} \left( \frac{\kappa \Gamma}{\text{сМ}^2} \right) \quad (2.18)$$

Для цветных металлов предел выносливости изменяется в более широких пределах:

$$\sigma_{-1} \approx (0,25 \div 0,5) \sigma_{\text{ср}} \quad (2.19)$$

Аналогично испытанию на чистый изгиб можно вести испытание на кручение в условиях циклически изменяющихся напряжений. В этом случае:

$$\tau_{-1} \approx (0,2 \div 0,3) \sigma_{\text{ср}} \quad (2.20)$$

или для обычных сталей берется  $\tau_{-1} = 0,6\sigma_{-1}$ , для хрупких материалов (высоколегированная сталь, чугун)  $\tau_{-1} \approx 0,8\sigma_{-1}$ .

Указанные соотношения и все им подобные следует, однако, применять с большой осторожностью, поскольку они получены только для определенных материалов и в определенных условиях испытаний (при изгибе, при кручении).

### **2.3.9 Физика процесса и виды повреждаемости и разрушения поверхностных слоёв деталей машин в условиях воздействия коррозионных сред.**

По механизму коррозионного процесса различают два основных типа коррозии: *химическую и электрохимическую*.

Под *химической коррозией* подразумевают взаимодействие металлической поверхности с окружающей средой, не сопровождающееся возникновением электрохимических (электродных) процессов на границе фаз. Механизм химической коррозии сводится к реактивной диффузии атомов или ионов металла сквозь постепенно утолщающуюся пленку продуктов коррозии (например окислы) и встречной диффузии атомов или ионов кислорода. По современным воззрениям этот процесс имеет ионно-электронный механизм, аналогичный процессам электропроводности в ионных кристаллах. Примером химической коррозии является взаимодействие металла с жидкими неэлектролитами или сухими газами в условиях, когда влага на поверхности металла не конденсируется, а также воздействие на металл жидких металлических расплавов. Практически наиболее важным видом химической коррозии является взаимодействие металла при высоких температурах с кислородом и др. газообразными активными средами ( $H_2S$ ,  $SO_2$ , галогены, водяные пары,  $CO$  и др.). Подобные процессы химической коррозии металлов при повышенных температурах носят также название газовой коррозии. Многие ответственные детали инженерных конструкций сильно разрушаются от газовой коррозии (лопатки газовых турбин, сопла ракетных двигателей, элементы электронагревателей, колосники, арматура печей и т.д.). Большие потери от газовой коррозии (угар металла) несет металлургическая промышленность. Стойкость против газовой коррозии повышается при введении в состав сплава различных добавок (хрома, алюминия, кремния и др.). Добавки алюминия, бериллия и магния к меди повышают ее сопротивление газовой коррозии в окислительных средах. Для защиты железных и стальных изделий от газовой коррозии поверхность изделия покрывают алюминием (алитирование).

Под *электрохимической коррозией* подразумевают процессы взаимодействия металлов с электролитами (в виде водных растворов, реже с неводными электролитами, например с некоторыми органическими

электропроводными соединениями или безводными расплавами солей при повышенных температурах). Процессы электрохимической коррозии протекают по законам электрохимической кинетики, когда общая реакция взаимодействия может быть разделена на следующие, в значительной степени самостоятельные, электродные процессы:

а) *анодный процесс* - переход металла в раствор в виде ионов (в водных растворах, обычно гидратированных) с оставлением эквивалентного количества электронов в металле;

б) *катодный процесс* - ассимиляция появившихся в металле избыточных электронов депполяризаторами.

Различают коррозию с водородной, кислородной или окислительной депполяризацией.

Различают следующие типы коррозионных разрушений. При равномерном распределении коррозионных разрушений по всей поверхности металла коррозию называют *равномерной*. Если же значительная часть поверхности металла свободна от коррозии и последняя сосредоточена на отдельных участках, то ее называют *местной*.

Наиболее часто встречающиеся в практике типы местной коррозии:

- *язвенная* - разрушения, имеющие вид раковины, сильно углубленной в толщу металла;
- *точечная* разрушения, имеющие вид точки (питтинга), глубоко проникающей в металл;
- *щелевая* - вызывает разрушение металла под прокладками, в зазорах, резьбовых креплениях и т.д.;
- *контактная* - вызывается контактом металлов, имеющих разные стационарные потенциалы в данном электролите;
- *межкристаллитная коррозия* - разрушение металла происходит по границам зерен. Она особенно опасна тем, что внешний вид металла не меняется, но он быстро теряет прочность и пластичность и легко разрушается, что с образованием между зернами рыхлых малопрочных продуктов коррозии.

*Коррозионное растрескивание* возникает при одновременном воздействии на металл агрессивной среды и механических напряжений. В металле появляются трещины транскристаллитного характера, которые часто приводят к полному разрушению изделий.

Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание наиболее опасны для конструкций, несущих механические нагрузки (мосты, тросы, рессоры, оси, автоклавы, паровые котлы и т.д.)

Электрохимическая коррозия может происходить в различных средах. Различают следующие типы электрохимической коррозии, имеющие наиболее важное практическое значение:

1. *Коррозия в электролитах.* К этому типу относятся коррозия в природных водах (морской и пресной), а также различные виды коррозии в жидких средах. В зависимости от характера среды различают:

- а) *кислотную* коррозию;
- б) *щелочную* коррозию;
- в) *солевую* коррозию.

По условиям воздействия жидкой среды на металл этот тип коррозии также характеризуется как коррозия при полном погружении, при неполном погружении, при переменном погружении, имеющие свои характерные особенности.

2. *Почвенная (грунтовая, подземная) коррозия* - воздействие на металл грунта, который в коррозионном отношении должен рассматриваться как своеобразный электролит. Характерной особенностью подземной электрохимической коррозии является большое различие в скорости доставки кислорода (основной деполяризатор) к поверхности подземных конструкций в разных почвах (в десятки тысяч раз). Значительную роль при коррозии в почве играет образование и функционирование макрокоррозионных пар вследствие неравномерной аэрации отдельных участков конструкции, а также наличие в земле блуждающих токов. В ряде случаев на скорость электрохимической коррозии в подземных условиях оказывает существенное влияние также развитие биологических процессов в почве.

3. *Атмосферная коррозия* - коррозия металлов в условиях атмосферы, а также любого влажного газа; наблюдается под конденсационными видимыми слоями влаги на поверхности металла (мокрая атмосферная коррозия) или под тончайшими невидимыми адсорбционными слоями влаги (влажная атмосферная коррозия). Особенностью атмосферной коррозии является сильная зависимость ее скорости и механизма от толщины слоя влаги на поверхности металла или степени увлажнения образовавшихся продуктов коррозии.

4. *Коррозия в условиях механического воздействия.* Этому типу разрушения подвергаются многочисленные инженерные сооружения, работающие как в жидких электролитах, так и в атмосферных и подземных условиях. Наиболее типичными видами подобного разрушения являются:

а) *Коррозионное растрескивание;* при этом характерно образование трещин, которые могут распространяться не только межкристаллитно, но также и транскристалльно. Примером подобного разрушения является щелочная

хрупкость котлов, сезонное растрескивание латуней, а также растрескивание некоторых конструкционных высокопрочных сплавов.

б) *Коррозионная усталость*, вызываемая воздействием коррозионной среды и знакопеременных или пульсирующих механических напряжений. Этот вид разрушения также характерен образованием меж- и транскристаллитных трещин. Разрушения металлов от коррозионной усталости встречаются при эксплуатации различных инженерных конструкций (валов гребных винтов, рессор автомобилей, канатов, штанг глубинных насосов, охлаждаемых валков прокатных станов и др.).

в) *Коррозионная кавитация*, являющаяся обычно следствием энергичного механического воздействия коррозионной среды на поверхность металла. Подобное коррозионно-механическое воздействие может приводить к весьма сильным местным разрушениям металлических конструкций (например для гребных винтов морских судов). Механизм разрушения от коррозионной кавитации близок к разрушению от поверхностной коррозионной усталости.

г) *Коррозионная эрозия*, вызываемая механическим истирающим воздействием другого твердого тела при наличии коррозионной среды или непосредственным истирающим действием самой коррозионной среды. Это явление иногда называют также коррозионным истиранием или фреттинг-коррозией.

## **Контрольные вопросы к главе 2.**

1. Перечислите основные виды эксплуатационных воздействий на изделия общего машиностроения.
2. Перечислите основные эксплуатационные свойства деталей машин.
3. Что такое контактная жесткость и на какие характеристики работы машины она влияет?
4. Охарактеризуйте три участка кривой износа.
5. Каким образом износостойкость влияет на ресурс работы изделия?
6. В каких случаях коррозионная стойкость имеет наибольшее значение в обеспечении эксплуатационных характеристик деталей машин?
7. При каких условиях эксплуатации должна нормироваться усталостная объемная прочность?
8. Чем отличается статическая и динамическая поверхностная контактная прочность?
9. Что такое предел усталости и предел выносливости?
10. Что такое технологический показатель качества?
11. Чем отличаются технологические и эксплуатационные показатели качества?

12. Какие основные свойства могут входить в комплексный показатель надежности?
13. В каких случаях используется показатель ремонтпригодности?
14. Перечислите основные виды эксплуатационных воздействий на изделия общего машиностроения.
15. Каковы причины возникновения дислокаций и чем определяется характер дислокации?
16. Какие критерии связывают закономерности усталостной повреждаемости и разрушения с циклическими деформациями?
17. Что такое предельные критерии и каково их назначение?
18. Какова сущность энергетической модели повреждаемости и разрушения поверхностных слоёв при эксплуатации?
19. Каким образом степень пластической деформации оказывает влияние на физико-химическую активность отдельных поверхностных зерен?
20. Что такое внутренняя адсорбция?
21. Каковы назначение и эксплуатационные характеристики смазочного материала?
22. В чем заключается физическая модель изнашивания поверхности при эксплуатации?
23. По каким интегральным характеристикам выполняются расчёты по износу кинематических пар?
24. Каковы основные причины разрушения детали при циклическом нагружении?
25. Какие зоны можно выделить на усталостном изломе?
26. Из каких фаз состоит процесс усталостного разрушения?
27. Что такое химическая и электрохимическая коррозия?

### **Глава 3. Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с качеством их поверхности**

#### **3.1. Характеристика показателей качества поверхностей деталей, обеспечивающих эксплуатационные свойства деталей машин.**

Под качеством поверхности понимают состояние поверхностного слоя материала детали. Поверхностный слой включает в себя наружную поверхность, которая контактирует с окружающей средой, и нижележащий слой материала с измененными по сравнению с основной частью (сердцевинной) строением и свойствами (механическими, физическими, химическими). Качество поверхностного слоя деталей машин определяется геометрией неровностей поверхности (шероховатость, волнистость и макроотклонения), физическим состоянием металла поверхностного слоя и его напряженностью.

Классификация показателей качества поверхностного слоя приведена в табл. 3.1. Эта классификация наиболее полно отражает физическую характеристику качества поверхностного слоя и устанавливает единые показатели для оценки влияния многочисленных технологических вариантов обработки на эксплуатационные свойства деталей. Данная классификация наряду с известными критериями шероховатости и волнистости, глубины и степени наклепа, остаточных макронапряжений содержит параметры кристаллической решетки, плотность дислокаций и концентрацию вакансий, размеры блоков, фрагментов и их взаимную разориентировку, микронапряжения и напряжения 3-го рода.

Табл. 3.1 Классификация показателей качества поверхностного слоя

Группа показателей	Подгруппа показателей	Наименование показателей	Обозначение	Единицы измерения
Геометрические показатели качества поверхности	Шероховатость	Высота неровностей профиля по десяти точкам	$R_z$	мкм
		Среднее арифметическое отклонение профиля	$R_a$	мкм
		Наибольшая высота неровностей профиля	$R_{max}$	мкм
		Средний шаг неровностей по вершинам локальных выступов	$S$	мкм
		Средний шаг неровностей;	$S_m$	
		Опорная длина профиля	$\eta_p$	мкм
		Относительная опорная длина профиля ( $p$ - уровень сечения профиля)	$t_p$	-
	Волнистость	Максимальная высота волнистости поверхности	$W_{max}$	мкм
		Средний шаг волнистости поверхности	$S_w$	мкм
		Средняя высота волнистости по десяти точкам	$W_z$	мкм
	Направление неровностей	Угол между направлением неровностей и направлением действия внешней нагрузки	-	град.
Физико	Степень деформации	Степень деформации отдельных зерен	$\varepsilon_{зр}$	%

		Степень деформации слоев (совокупности зерен)	$\varepsilon_{\text{пс}}$	%
Деформаци- онное упрочнение (наклеп)	Глубина наклепа		$h_H$	мкм
	Степень наклепа		$u_H$	%
	Градиент наклепа		$u_{\text{гр}}$	кгс/мм <sup>3</sup>
Субструкту- ра	Размеры фрагментов		$l_{\phi}$	мкм
	Размеры блоков		$l_{\delta}$	мкм
	Угол разориентировки фрагментов		$a_{\phi}$	градусы
	Угол разориентировки блоков		$a_{\delta}$	градусы
Кристалли- ческая структура	Параметры решетки			А
	Плотность дислокаций			см <sup>-2</sup>
	Концентрация вакансий			—
Остаточные напряжения	Технологические макронапряжения			кгс/мм <sup>2</sup>
	Микронапряжения			кгс/мм <sup>2</sup>
	Напряжения 3-го рода			кгс/мм <sup>2</sup>

### 3.2 Геометрические характеристики качества поверхности и их определение.

Идеально правильная поверхность не может быть получена в результате какого-либо метода обработки. Реальная поверхность физического тела несовершенна, и суждение о степени несовершенства зависит от масштаба рассмотрения. Можно рассматривать отклонения от геометрической правильности поверхности макрогеометрического, микро- и субмикроскопического порядка.

*Макрогеометрические* отклонения рассматриваются на больших участках реальной поверхности детали, они характеризуют точность формы детали; *микрогеометрия* — на малых участках реальной поверхности с длиной стороны квадрата от 1 мм до 1 мкм. Геометрическое представление о форме такой поверхности принято называть *шероховатостью*. Микрогеометрия поверхностей деталей, наряду с физико-механическими свойствами поверхностного слоя, является одним из основных факторов, определяющих эксплуатационные свойства и работоспособность машин, их ресурс и надежность.

*Субмикроскопические* неровности рассматриваются на участках поверхности, размер стороны квадрата которой измеряется от 1 до 10 мкм ( $10^{-3}$  -  $10^{-2}$  мм, или 1000 - 10000А). Геометрические несовершенства этой области

определяются молекулярной структурой поверхности, она пока не имеет специального назначения, почти совершенно не изучена, так как большей частью лежит за пределами чувствительности современных приборов.

Геометрические отклонения поверхностей различают в зависимости от отношения шага  $L$  к высоте неровностей  $H$ : при  $L:H$  более 1000 — макроскопические отклонения или отклонения от правильной геометрической формы (конусность, овальность, вогнутость и др.), если  $L:H$  от 50 до 1000 — волнистость поверхности и  $L:H$  до 50 — шероховатость поверхности [29].

*Шероховатость поверхности* — совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности. Шероховатость поверхности после механической обработки — это геометрический след режущего или деформирующего инструмента (металлического или абразивного), движущегося в соответствии с установленным режимом резания, искаженный в результате пластической и упругой деформации и сопутствующей процессу резания вибрацией технологической системы станок—приспособление—инструмент—деталь.

В стандарт на шероховатость поверхности ГОСТ2789-73 /25/ вошли следующие характеристики шероховатости:

- *высотные*:  $R_a$ -среднее арифметическое отклонение профиля;  $R_z$ - высота неровностей профиля по десяти точкам;  $R_{max}$ -наибольшая высота неровностей профиля;
- *шаговые*:  $S$ -средний шаг неровностей по вершинам локальных выступов;  $S_m$ - средний шаг неровностей;  $t_p$ -относительная опорная длина профиля, где  $p$  - уровень сечения профиля.

В основу количественной оценки характеристик шероховатости принята система отсчета, в которой в качестве базовой линии служит средняя линия профиля. Профиль поверхности со средней линией и другими параметрами в соответствии с ГОСТ 2789–73 приведен на рис. 3.1.

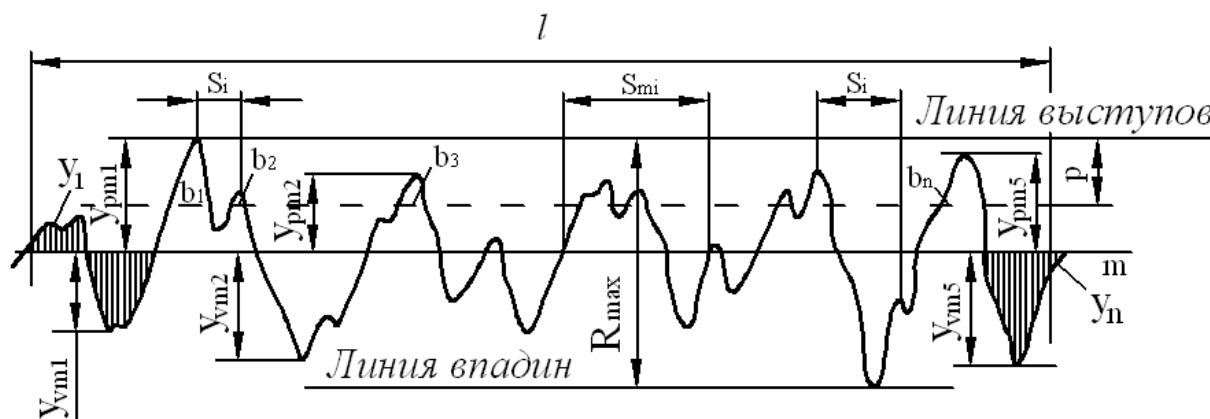


Рис. 3.1. Профиль поверхности и его характеристика

*Средняя линия профиля* – это базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины  $l$  среднее квадратическое отклонение точек профиля от этой линии минимально. Линия, эквидистантная средней линии и проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины, называется *линией выступов профиля*. Линия, эквидистантная средней линии и проходящая через низшую точку профиля в пределах базовой длины, называется *линией впадин профиля*. Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины представляет собой *наибольшую высоту неровностей профиля*  $R_{max}$ .

*Высота выступов профиля* – это расстояние от средней линии профиля до высшей точки выступа профиля.

*Глубина впадины профиля*  $y_{vm}$  – это расстояние от средней линии профиля до низшей точки впадины профиля.

*Неровность профиля* – это выступ профиля и сопряженная с ним впадина профиля.

*Шаг неровностей профиля* – это длина отрезка средней линии профиля  $S_{mi}$ , содержащая выступ профиля и сопряженную с ним впадину профиля. *Средний шаг неровностей профиля*  $S_m$  – это среднее значение шага неровностей профиля по средней линии в пределах базовой длины.

*Шаг местных выступов*  $S_i$  – это длина отрезка средней линии между проекциями на нее двух наивысших точек соседних местных выступов профиля. *Средний шаг местных выступов профиля*  $S$  – это среднее значение шага местных выступов в пределах базовой длины.

Для оценки шероховатости поверхности в машиностроении наибольшее распространение получили два высотных критерия  $R_z$  и  $R_a$ .

*Высота неровностей профиля по десяти точкам*  $R_z$  представляет собой сумму средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины профиля  $l$ :

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5}, \quad (3.1)$$

где  $y_{pmi}$  – высота  $i$ -го наибольшего выступа профиля,  $y_{vmi}$  – глубина  $i$ -ой наибольшей впадины профиля.

*Среднее арифметическое отклонение профиля*  $R_a$  представляет собой среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины  $l$ :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (3.2)$$

Или приближенно

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.3)$$

где  $y$  – отклонение профиля, определяемое расстоянием между любой точкой профиля и средней линией,  $l$  – базовая длина,  $n$  – число выбранных точек на базовой длине.



Многие эксплуатационные свойства поверхности зависят от фактической поверхности соприкосновения с сопряженными деталями, например контактная жесткость. Для приближенной оценки возможной поверхности контакта используется критерий  $\eta_p$  – *опорная длина профиля*, который определяется суммой длин отрезков в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии. Для сопоставления опорных возможностей разных поверхностей, имеющих в том числе и одинаковые высотные характеристики неровностей профиля, пользуются критерием *относительной опорной длины профиля*  $t_p$ , который определяется отношением опорной длины профиля к базовой длине.


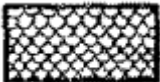

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i \quad (3.4)$$

где  $b_i$  – длина отрезка, отсекаемого в материале выступа профиля,  $p$  – уровень сечения профиля, определяемый расстоянием между линией выступов профиля и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов профиля, выраженным в процентах от  $R_{max}$ .

Большое значение для поверхностей, работающих в условиях трения скольжения имеет направление неровностей. Типы направлений неровности в соответствии с ГОСТ 2789-73 представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Типы направлений неровностей поверхности

Типы направлений неровностей	Схематическое изображение	Пояснение
Параллельное		Параллельно линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Перпендикулярное		Перпендикулярно линии, изображающей на чертеже

Типы направлений неровностей	Схематическое изображение	Пояснение
		поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Перекрещивающееся		Перекрещивание в двух направлениях наклонно к линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Произвольное		Различные направления по отношению к линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Кругообразное		Приблизительно кругообразно по отношению к центру поверхности, к шероховатости которой устанавливаются требования
Радиальное		Приблизительно радиально по отношению к центру поверхности, к шероховатости которой устанавливаются требования

Для оценки несущей способности шероховатости в настоящее время наиболее широкое применение получила относительная опорная кривая профиля поверхности, построенная в относительных координатах (Рис. 3.2), описываемая уравнением (3.4). Эта кривая может быть использована и для косвенной оценки износостойкости поверхности.

$$t_p = b\varepsilon^v, \quad (3.5)$$

где  $b, v$ -параметры начального участка опорной поверхности;  $\varepsilon$  - относительное расстояние от линии выступов  $\varepsilon = y/R_{max}$ ;  $y$ - расстояние от линии выступов, до рассматриваемого уровня, мкм.

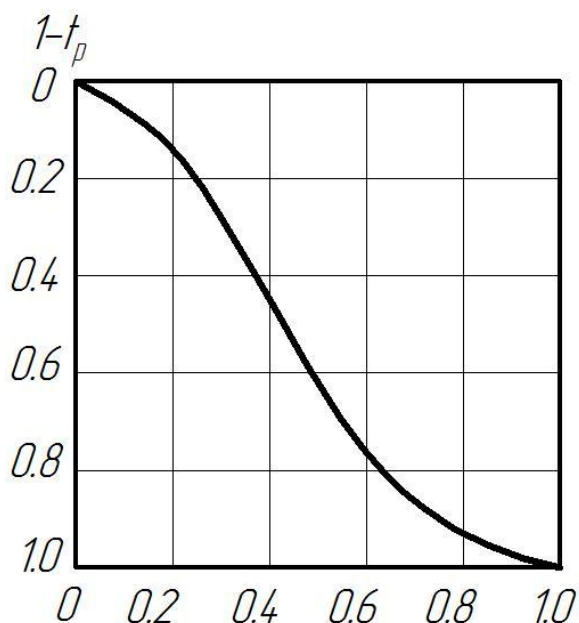


Рис. 3.2. Опорная кривая профиля.

Волнистость поверхности, согласно рекомендации СЭВ РС3951-73 - это совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину для имеющейся шероховатости поверхности. Физически обоснованной, а тем более естественной физической границы между шероховатостью и волнистостью поверхности как совокупностью неровностей с шагами, превышающими базовую длину, не имеется. Однако, наличие волн на поверхности приводит к уменьшению опорной площади в 5—10 раз по сравнению с ровной шероховатой поверхностью.

По рекомендации СЭВ (РС 3951-73) для оценки волнистости поверхности следует учитывать максимальную высоту волнистости  $W_{\max}$ , среднюю высоту волнистости по десяти точкам  $W_z$ , вычисляемые аналогично параметрам  $R_{\max}$  и  $R_z$  шероховатости поверхности, и средний шаг волнистости  $S_w$ , определяемой как среднее арифметическое расстояние из пяти значений между волнами на пяти равновеликих отдельных участках измерений волнистости (аналогично шагу  $S_m$  для шероховатости). Волны могут образовываться на детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях, в связи с чем рекомендуется различать продольную и поперечную волнистость.

### 3.3 Физико-механические показатели качества поверхностного слоя и их определение.

В поверхностном слое деталей машин следует различать его наружную поверхность, которая соприкасается с внешней средой, поверхностный слой и его верхнюю часть — граничный слой. Специфичность химических, физических

и энергетических условий на внешней поверхности резко выделяет эту часть поверхностного слоя, названного граничным слоем.

Поверхность твердого тела, по сравнению с его внутренним строением, имеет ряд особенностей. Любой атом, расположенный внутри твердого тела с идеальной кристаллической решеткой, находится в состоянии подвижного устойчивого равновесия, поскольку для него по всем направлениям интенсивность силового поля одинакова. В ином положении оказываются атомы, которые находятся у поверхности; они имеют только односторонние связи — в тело металла, поэтому их состояние неуравновешенное, неустойчивое, они более активны, обладают избыточной энергией (свободной) по сравнению с атомами, находящимися в объеме. При этом атомы остаются на поверхности там, где были в момент ее образования, это и обеспечивает твердым телам макроскопическую неизменяемость. Поверхностная энергия граничного слоя в них создается примерно в двух слоях атомов (на толщине порядка  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  см). Этим и определяется понятие «наружная поверхность» твердого тела.

Физическое состояние (структура, свойства) и напряженность поверхностного слоя детали в основном являются следствием упруго-пластической деформации и местного нагрева, возникающих в зоне механической обработки резанием или поверхностным пластическим деформированием, а также явлениями диффузии адсорбированных атомов из окружающей среды. В связи с этим для оценки физического состояния поверхностного слоя детали после механической обработки рекомендуются следующие показатели.

*Степень пластической деформации.* Пластическую деформацию характеризуют изменением степени пластической деформации по глубине поверхностного слоя (послойная степень деформации)  $\varepsilon_{\text{пс}}$  и степенью деформации отдельных зерен  $\varepsilon_{\text{зр}}$ .

*Деформационное упрочнение (наклеп).* Деформационное упрочнение поверхностного слоя оценивают глубиной  $h_H$  и степенью наклепа  $u_n$ , а интенсивность наклепа по глубине поверхностного слоя — градиентом наклепа  $u_{\text{гр}}$ , являющимся особенно важным показателем поверхностного наклепа после окончательной и отделочной обработки поверхностей силовых деталей:

$$u_n = \frac{H_{\mu \text{max}} - H_{\mu \text{исх}}}{H_{\mu \text{исх}}} = \frac{\Delta H_{\mu}}{H_{\mu \text{исх}}} \quad (3.6)$$

$$u_{\text{гр}} = \frac{H_{\mu \text{max}} - H_{\mu \text{исх}}}{h_H} = \frac{\Delta H_{\mu}}{h_H} \quad (3.7)$$

где  $H_{\mu\max}$  и  $H_{\mu\text{исх}}$  — максимальная и исходная микротвердость металла поверхностного слоя.

Непосредственное определение степени деформации поверхностного слоя имеет известные трудности, поэтому обычно ограничиваются определением параметров деформационного упрочнения.

Для определения глубины, степени и градиента наклепа наибольшее распространение получили методы измерения микротвердости на поверхности косых шлифов и при послойном стравливании, а также методы рентгеноструктурного анализа.

Основными показателями для характеристики субструктуры металла поверхностного слоя рекомендуются размеры фрагментов  $l_\phi$  и блоков  $l_\delta$  и углы разориентировки их  $\alpha_\phi$ ,  $\alpha_\delta$ . Оценку искаженности кристаллической решетки металла поверхностного слоя можно производить по параметрам решетки, плотности дислокаций и концентрации вакансий.

**Остаточные напряжения.** Появление остаточных напряжений связано с условиями изготовления деталей, с их предысторией. Поэтому технологические процессы изготовления деталей должны проектироваться с таким расчетом, чтобы возникающие в поверхностных слоях остаточные напряжения гарантировали надежность работы деталей в заданных условиях эксплуатации.

В реальных условиях в большинстве случаев остаточные напряжения возникают в условиях одновременного действия различных факторов: механических, тепловых и физико-химических. Так, при пластической деформации деталей из сложных сплавов остаточные напряжения могут возникнуть от одновременного неоднородного протекания процессов пластической деформации и фазовых превращений. Напряжения в металле или сплаве, независимо от причин, их вызывающих (от воздействия сил, тепла, частиц высокой энергии и др.), в физике твердого тела рассматриваются как следствие искажения кристаллической решетки.

Остаточные напряжения можно классифицировать по признакам протяженности силового поля и по физической сущности. Общепринятой является классификация по первому признаку:

- Напряжения 1-го рода — макронапряжения, охватывающие области, соизмеримые с размерами детали; они имеют ориентацию, связанную с формой детали; неоднородное деформированное состояние детали может возникнуть после неоднородной пластической деформации в результате обработки металла или детали волочением, прокаткой, ковкой, холодной правкой, резанием, механическим упрочнением поверхности, а также вследствие неоднородной пластической деформации при нагреве и охлаждении; вследствие неоднородного изменения объема при фазовых превращениях, как в твердом состоянии

(закалка, старение, цементация стали твердым карбюризатором и другие физико-химические процессы), а также при неоднородном протекании фазовых превращений из жидкого в твердое состояние и наоборот (цементация в жидких ваннах, электролитическое осаждение металлов, усадка при кристаллизации отливки) и из твердого в газообразное состояние и наоборот (азотирование, цианирование и газовая цементация стали).

- Напряжения 2-го рода — микронапряжения, распространяющиеся на отдельные зерна металла или на группу зерен; они возникают в поликристаллических металлах в процессе деформации больших объемов в результате взаимодействия зерен между собой, к ним относят также и напряжения внутри отдельного зерна, обусловленные мозаичностью его структуры — результат взаимодействия между отдельными блоками. Микронапряжения являются следствием неоднородности физических свойств различных компонентов поликристалла, а также стесненных условий деформации отдельного зерна и анизотропии свойств внутри него. Основными причинами возникновения микронапряжений являются фазовые превращения, изменения температуры, анизотропия механических свойств отдельных зерен, границы зерен и распад зерна на блоки при пластической деформации. В процессе старения в микро- и субмикроскопических объемах возникают локализованные резкие концентрации напряжений. При изменении температуры микронапряжения могут возникнуть из-за наличия в металле различных по природе компонентов с различными коэффициентами линейного расширения (например, зерна графита в чугунах, случайные включения), а также из-за анизотропии свойств отдельных зерен, особенно для металлов с некубической решеткой, обуславливающей различие в величине линейного расширения по разным кристаллографическим осям.

- Напряжения 3-го рода — субмикроскопические, относящиеся к искажениям атомной решетки кристалла; ориентация их связана со структурой атомной решетки. В этом случае термин «напряжения» является весьма условным и более правильно пользоваться термином «статические искажения решетки» или «искажения 3-го рода». Причиной образования искажений кристаллической решетки являются главным образом дислокации и внедренные атомы. Различают термодинамические и статические искажения кристаллической решетки. Искажения решетки, вызванные тепловыми колебаниями, всегда имеются в кристалле, находящемся при температуре выше  $0^{\circ}\text{K}$ . Распределение этих искажений непрерывно изменяется, поэтому такие искажения называют динамическими. Распределение искажений, вызванных присутствием в решетке растворенных атомов и различного рода несовершенств

структуры, при низких температурах остается постоянным, поэтому такие искажения называют статическими.

Напряженное состояние поверхностного слоя детали может характеризоваться наличием как сжимающих, так и растягивающих напряжений, максимальное значение которых не всегда имеет место на поверхности, а смещается в глубь поверхностного слоя.

Величина и знак макронапряжений определяются, прежде всего, дислокационной структурой и характером распределения дислокаций и других несовершенств решетки по глубине деформированного поверхностного слоя.

*Границы зерен.* Особенности кристаллического строения межзеренного граничного слоя обуславливают и различие напряженного состояния между зернами и внутри зерна. Толщина граничного слоя состоит из небольшого числа атомных слоев (примерно на один порядок меньше зерна), вследствие чего напряжения на границах зерен будут как бы переходными между микронапряжениями и напряжениями 3-го рода. Скопление большого количества дислокаций в межзеренных граничных слоях вызывает многочисленные искажения атомной решетки, а это порождает напряжения 3-го рода. Наряду с этим граничный слой — зона силового взаимодействия между отдельными зернами, которое создает поле микронапряжений, охватывающих всю поверхность зерна.

*Распад зерна на блоки.* Разделение объема зерна на блоки (мозаичность структуры) создает в зерне микронапряжения. Причиной возникновения их являются вновь образовавшиеся границы между блоками, строение которых во многом подобно границам зерен. В граничном слое между блоками накапливаются дислокации и атомы примесей, которые искажают кристаллическую решетку и порождают напряжения. С увеличением деформации зерна растет и степень мозаичности его, вырастают неупругие изгибы, оказывающие влияние на развитие системы блоков, их разориентировку, а это будет способствовать дальнейшему усилению неравномерностей деформации отдельных блоков. В процессе деформации наряду с дроблением зерен на области, разделенные дислокационными стенками и малоугловыми границами, происходит также сложная упругая деформация зерен в целом и отдельных блоков. Эта упругая деформация может быть вызвана и действием соседних зерен, и образованием избыточных дислокаций одного знака внутри блоков при деформации. В результате такой упругой деформации в пределах зерен и блоков межплоскостные расстояния изменяются неоднородно (рис. 3.3).

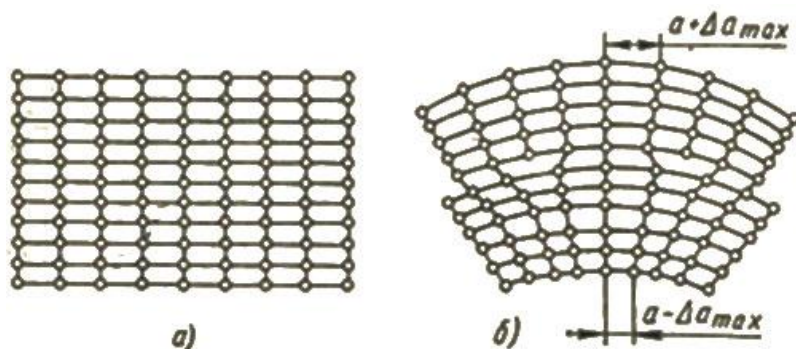


Рис. 3.3. Схема неоднородного изменения межплоскостных расстояний при изгибе: а — до изгиба; б — после изгиба

Если обозначить абсолютное максимальное упругое отклонение периода решетки через  $\Delta a$ , то отношение  $\Delta a/a$  будет характеризовать величину максимального упругого отклонения межплоскостных расстояний от равновесных. Величину  $\Delta a/a$  принимают за характеристику микронапряжений или искажений 2-го рода. Эти искажения вызывают уширение линий рентгенограммы  $\Delta b$ , но подчиняются другим закономерностям, чем уширение за счет измельчения размеров блоков. Величину,  $\Delta a/a$  определяют по формуле

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{4tg\Theta} \quad (3.8)$$

где  $\Theta$  — угол отражения линии рентгенограммы.

Упругая деформация зерна вероятнее всего вызывает только некоторое перераспределение микронапряжений и выравнивание их. При рентгеновских исследованиях после упругопластической деформации обнаруживаются микронапряжения в отдельных зернах. Пластическая деформация, вызывающая распад зерна на блоки, сопровождается образованием значительных микронапряжений, по величине близких к пределу текучести.

Отличие макро - от микронапряжений заключается не только в величине масштаба проявления их. Макронапряжения могут возникать в любой сплошной однородной изотропной среде. Микронапряжения в таком материале существовать не могут, они могут возникнуть вследствие существенной неоднородности кристаллического материала и его анизотропных свойств.

**Искажения кристаллической решетки (напряжения 3-го рода)** в напряженном состоянии твердого тела играют важную роль. Напряжения 3-го рода, связанные с отклонением атомов от положения равновесия в решетке, и микронапряжения характеризуют энергетический уровень обрабатываемого металла. Повышение энергетического уровня в наклепанном металле делает его термодинамически неустойчивым при всех температурах, он всегда стремится перейти в более стабильное состояние с меньшей свободной энергией.

**Анизотропия механических свойств в отдельных зернах.** В реальном поликристаллическом металле вместо предполагаемого по расчету равномерного

распределения напряжений от действия внешней нагрузки имеет место значительная неравномерность напряжений (деформаций) в отдельных зернах металла. Неравномерная пластическая деформация обуславливается разницей в модулях упругости различных агрегатов, образующих поликристалл, а также неодинаковой способностью деформироваться по разным кристаллографическим осям одного и того же зерна, которая определяется величиной модулей упругости  $E$  и  $G$ . При отсутствии преобладающей ориентации зерен величину неравномерности напряжений в какой-то мере характеризует отношение максимальных и минимальных значений модуля упругости. По упрощенным теоретическим расчетам для металлов с кубической решеткой неравномерность напряжений составляет примерно 30%. В действительности степень неравномерности значительно выше. В поликристалле даже при макроскопически однородном поле напряжений пластическая деформация распределяется в микрообъемах неравномерно, степень неравномерности при этом достигает 400—500%. С развитием пластической деформации разница в напряжениях отдельных зерен должна снижаться. При разгрузке около пластически деформированных зерен возникает зона микронапряжений. Повторные нагружения еще больше усложняют картину распределения напряжений в микрообъеме. Таким образом, анизотропия механических свойств при повторных нагружениях может привести к возникновению неравномерно распределенных микронапряжений.

Для измерения макронапряжений в основном применяются: механический и рентгеновский методы. Механический метод основан на замере прогиба или деформации на стержнях прямоугольного сечения и пластинах, или на кольцах и полосках, вырезанных из тонкостенной трубы (втулки). Рентгеновский метод, позволяющий вычислить макронапряжения непосредственно в любой точке на поверхности без разрушения детали. Точность определения напряжений относительно невысокая ( $\pm 5$ — $20$  кгс/мм<sup>2</sup>). Возникают также трудности при разделении макро- и микронапряжений в наклепанных поверхностных слоях. Микронапряжения и искажения кристаллической решетки определяются только с помощью методов рентгеноструктурного анализа.

### **3.4 Влияние показателей качества поверхности на эксплуатационные свойства деталей машин.**

Как уже упоминалось, показатели качества поверхности оказывают решающее влияние на ее эксплуатационные свойства. Причем для каждого эксплуатационного свойства есть определенный набор показателей качества, которые и формируют это свойство, одни в большей степени, другие в меньшей.

В таблице 3.3 представлена взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с показателями качества их поверхности с градацией по степени их влияния.

Табл. 3.3. Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с показателями качества их поверхностей и поверхностных слоев [24]

<http://stehmash.narod.ru/stm1str6tab1.htm>

Эксплуатационные свойства	Геометрические характеристики поверхности											Физико-механические характеристики поверхностного слоя			
	Шероховатость								Волнистость			Наклеп поверхностного слоя		Остаточные напряжения	
	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>	S <sub>m</sub>	S	t <sub>p</sub>	r	r'	W <sub>a</sub>	W <sub>max</sub>	S <sub>w</sub>	H	h	σ	h <sub>σ</sub>
Износостойкость: трение без смазочного материала	+	+	+	+		+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>		+	+	+		+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>
Трение	+ <sup>*1</sup>	+	+	+ <sup>*1</sup>	+	+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>	+	+ <sup>*1</sup>	+	+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>		+ <sup>*1</sup>	
Трение со смазочным материалом	+ <sup>*1</sup>	+	+	+ <sup>*1</sup>	+	+ <sup>*1</sup>	+	+	+ <sup>*1</sup>	+	+ <sup>*1</sup>				
Избирательный перенос <sup>*2</sup>	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+ <sup>*1</sup>		+ <sup>*1</sup>	
Сопротивление усталости	+	+	+ <sup>*1</sup>	+				+ <sup>*1</sup>		+ <sup>*1</sup>	+	+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>
Контактная жесткость	+	+	+	+		+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>		+	+	+	+ <sup>*1</sup>		+	
Виброустойчивость	+	+	+	+ <sup>*1</sup>		+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>		+		+	+ <sup>*1</sup>	+	+	+
Коррозионная стойкость	+	+	+	+ <sup>*1</sup>	+	+		+	+ <sup>*1</sup>	+	+	+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>
Прочность соединения с натягом	+	+		+		+ <sup>*1</sup>	+ <sup>*1</sup>		+		+	+			
Плотность (герметичность) соединений	+ <sup>*1</sup>	+	+	+	+	+ <sup>*1</sup>			+ <sup>*1</sup>	+	+				
Прочность сцеплений покрытий	+	+ <sup>*1</sup>	+	+ <sup>*1</sup>		+	+	+	+	+	+	+ <sup>*1</sup>	+	+ <sup>*1</sup>	+

Обтекаемость газами и жидкостями	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
<p><sup>*1</sup>Характеристики, оказывающие основное влияние на данное эксплуатационное свойство.</p> <p><sup>*2</sup>Избирательный перенос (ИП) — вид фрикционного взаимодействия, характеризующийся в основном молекулярной составляющей силы трения. Устойчивым признаком ИП является образование защитной металлической пленки, обладающей способностью снижать трение и уменьшать износ.</p> <p>Обозначения:</p> <p>Ra — среднее арифметическое отклонение профиля,  Rz — высота неровностей профиля по десяти точкам,  Rmax — наибольшая высота неровностей профиля,  Sm — средний шаг местных выступов профиля;  t<sub>p</sub> — относительная опорная длина профиля,  r — радиус закругления выступов;  r' — радиус закругления впадин,  Wa — среднее арифметическое отклонение профиля волн,  Wmax — наибольшая высота волн,  Sw — средний шаг неровностей волн;  H — микротвердость поверхностного слоя,  h — глубина наклепанного слоя,  σ — остаточные напряжения на поверхности,  h<sub>σ</sub> — глубина залегания остаточных напряжений.</p>															

### Контрольные вопросы к главе 3.

1. Что понимают под качеством поверхностного слоя детали?
2. Приведите классификацию показателей качества поверхностного слоя.
3. Какие показатели качества поверхностного слоя относятся к геометрическим?
4. Что такое шероховатости и волнистость? Какими показателями они оцениваются?
5. Что характеризует относительная опорная кривая профиля?
6. Какие показатели качества поверхностного слоя относятся к физико-механическим?
7. Каким процессами формируется физическое состояние поверхностного слоя детали?
8. Какими показателями характеризуют пластическую деформацию?
9. Какими показателями оценивают деформационное упрочнение поверхностного слоя?

10.Каким образом показатели качества поверхности влияют на эксплуатационные свойства деталей машин?

#### **Глава 4. Физико-технологические основы методов формирования качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин и методы их реализации**

##### **4.1 Обеспечение качества и эксплуатационных свойств деталей машин на стадии конструкторско-технологической подготовки производства.**

Конструктор, разрабатывая конструкцию машины, механизма, какого-либо устройства и т.д., обеспечивает не только соответствующий техническому заданию уровень показателей назначения, но и необходимые показатели надежности изделия, в том числе ресурс работы. Требования к надежности устанавливает заказчик по согласованию с разработчиком (изготовителем) с учетом уровня надежности лучших отечественных и зарубежных аналогов (прототипов) и экономических, экологических и других факторов. При этом выполнение требований к надежности изделий должно подтверждаться расчетами на этапе проектирования, испытаниями опытных образцов и контролироваться при серийном изготовлении и плановом ремонте изделий, а также в период их эксплуатации.

При обеспечении показателей надежности конструктор должен рассматривать всю проблему в целом и выбирать соответствующие методы обеспечения надежности. У конструктора в резерве имеется достаточно большой набор инструментов обеспечения надежности изделия, в том числе:

- обеспечение ремонтпригодности;
- защита от помех и перегрузок;
- унификация конструкций;
- отработка на технологичность;
- разработка специальных технических условий и др.

Одним из инструментов обеспечения надежности изделия в целом является обеспечение требуемых эксплуатационных свойств деталей машин, так как они в весьма значительной степени определяют ресурс работы машины и требуемый уровень качества ее функционирования. Задача конструктора выбрать оптимальные численные характеристики эксплуатационных свойств деталей изделия и корректно трансформировать их в соответствующий набор показателей качества деталей, в том числе и показателей качества поверхностного слоя. Эти показатели качества отражаются в технической документации на изделие в виде размеров с допусками, параметров шероховатости, а также в технических требованиях, где могут быть указаны

требования к термической обработке, контролю, нанесению покрытий, упрочняющей или отделочной обработке и др.

Далее технолог должен спроектировать такой технологический процесс, который в полной мере обеспечит требуемый уровень (численные значения) заданных конструктором показателей качества деталей, в том числе и показателей качества поверхностного слоя. Технологический процесс изготовления деталей должен разрабатываться с учетом условий, в которых они в дальнейшем будут работать.

В качестве примера, покажем как износостойкость деталей машин можно повысить путем простого изменения метода обработки или даже режима резания, или геометрии режущего инструмента. При трении сопряженных деталей, обработанных с одинаковой точностью и шероховатостью, наибольший износ имеют отверстия, доведенные свободным абразивом, а наиболее износостойкими оказываются хонингованные втулки. Влияние методов обработки поверхностей с малой шероховатостью на износостойкость деталей также показывают десятичасовые испытания износостойкости плоскостей столиков измерительных приборов из закаленной стали У8А в условиях сухого трения с давлением 0,098 МПа (1 кгс/см<sup>2</sup>). При одинаковой плоскостности и шероховатости поверхности, соответствующей 0,8 мкм, столики, шлифованные с тонкой правкой абразивного керамического круга, изнашивались почти на 40% меньше, чем столики, шлифованные графитовым кругом, и столики, доведенные свободным абразивом. При обработке тех же деталей с шероховатостью Ra0,4 мкм наивысшую износостойкость показали столики, шлифованные графитовым кругом, а самый большой износ имели детали, доведенные свободным абразивом. Влияние методов и режимов обработки деталей на их износостойкость в значительной степени обусловлено шероховатостью трущихся поверхностей и параметрами опорных кривых шероховатости поверхностей, а также степенью их наклепа. Это объясняется еще и тем, что износостойкость поверхности деталей зависит, в частности, от их несущей способности, определяемой произведением фактической опорной поверхности на предел текучести металла поверхностного слоя.

Для повышения износостойкости может также применяться *цементация*, *азотирование*, гальванические покрытия деталей, поверхностная закалка газовым пламенем, высокочастотная закалка, пластическое деформирование (обкатывание, раскатывание, прошивание, калибрование). В последнее время для повышения износостойкости всё чаще применяют материалы на основе полимеров, способных работать без смазки за счёт отделения длинных молекул, похожих по своим свойствам на смазочные материалы; углеграфитных и металлокерамических материалов, первые из которых выделяют в качестве

смазки мягкие угольные частицы, а вторые обладают чрезвычайно высокой твёрдостью.

Усталостная прочность деталей машин также в значительной степени зависит от методов обработки деталей. Применение различной технологии обработки деталей из нержавеющей стали 2Х13 увеличивает усталостную прочность с 206 до 363 МПа (с 21 до 37 кгс/мм<sup>2</sup>). При этом наивысшую усталостную прочность показывают детали, полированные после продольного строгания, более низкую усталостную прочность (353 МПа (36 кгс/мм<sup>2</sup>)), обработанные фрезерованием с шероховатостью 14,0 мкм и продольным направлением рисок. Минимальную прочность (334 МПа (34 кгс/мм<sup>2</sup>)) показывают детали, после полирования с поперечным направлением штрихов обработки и после полирование с поперечным направлением штрихов обработки (304 МПа (31 кгс/мм<sup>2</sup>)).

Увеличение скорости резания при точении высокопрочной стали, воспринимающей закалку, ведет к повышению усталостной прочности на 12—30%. Увеличение подачи при точении стали 50 в связи с ее упрочнением при росте нагрузки повышает усталостную прочность, а при точении закаленной стали 30ХГСМЛ в связи с ее отпуском снижает усталостную прочность. Особенно сильно влияют режимы обработки на усталостную прочность титановых сплавов. Например, при круглом шлифовании титанового сплава ВТЗ-1 изменение режимов шлифования (скорости круга и детали) и абразивных материалов приводит к возрастанию усталостной прочности со 154 до 432 МПа (с 16 до 44 кгс/мм<sup>2</sup>), т. е. почти втрое.

Таким образом при проектировании технологического процесса изготовления детали необходимо подбирать такие методы и режимы обработки, которые обеспечивали бы оптимальное, с точки зрения эксплуатационных свойств детали, качество поверхностного слоя. Каждый из методов обработки помимо заданного уровня показателей качества формирует также и ряд других его характеристик, причем значения этих характеристик могут в значительной мере ограничивать режимы обработки, влияя на такие характеристики технологического процесса, как производительность и технологическая себестоимость.

Требования к параметрам шероховатости устанавливают на основании их связи с функциональными показателями деталей машин, причем значения этих параметров могут быть рассчитаны по теоретическим или эмпирическим уравнениям связи показателей эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений с характеристиками качества поверхностей (табл. 1.3, приложение А).

## 4.2 Влияние лезвийной и абразивной обработки на показатели качества и эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин

При лезвийной обработке (точении, фрезеровании, сверлении и др.) формируется не только микрорельеф поверхности (шероховатость, волнистость), но и под действием различных факторов (теплового эффекта, пластической деформации в зоне резания и др.) изменяются такие параметры, как микротвердость, остаточные напряжения и др. При этом шероховатость поверхности является управляемым параметром, а остальные характеристики формируются как неуправляемые параметры и являются скорее ограничивающими условиями при назначении режима обработки, геометрии инструмента и др.

**Шероховатость поверхности.** Шероховатость после механической обработки - это след режущего инструмента (металлического или абразивного), искаженный пластической и упругой деформацией, а также вибрацией технологической системы (рис. 4.1).

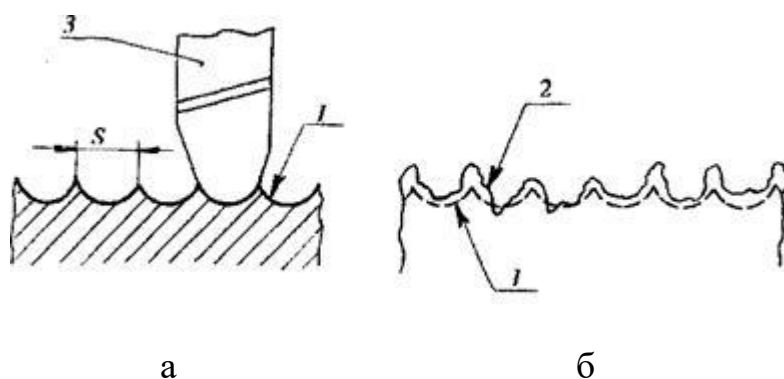


Рис. 4.1. Схема образования неровностей на поверхности, обработанной лезвийным инструментом а - образование закономерного (регулярного) поперечного профиля поверхности; б - искажение профиля пластической деформацией при отделении стружки; 1,2 - соответственно закономерный и искаженный профили поверхности; 3 - резец; S - шаг неровностей – подача.

Причинами, обуславливающими видоизменение и искажение (трансформацию) основного геометрического профиля, являются также копирование микронеровностей рабочих кромок резца или абразивных зерен и образование зубцов нароста, приставших к поверхности детали, упругое поднятие материала детали после прохода режущего инструмента и другие технологические факторы, определяющие условия механической обработки (зазоры во вращающихся деталях станка, несбалансированность их и др.).

Например, чем меньше подача при токарной обработке и больше радиус закругления резца, тем чище поверхность и, соответственно, меньше

шероховатость. Для расчета теоретической высоты гребешков при токарной обработке существует определенная зависимость. Но расчетная высота не является действительной высотой гребешка, так как не учитывается образование нароста на режущей кромке резца. Высота гребешка будет выше. Ее максимальная величина достигает при определенной температуре, дальше с ростом температуры идет уменьшение высоты гребешка и при некоторой температуре нарост на режущей кромке полностью исчезает.

Режущий инструмент разрушает на своем пути разнообразно расположенные зерна металла; некоторые из них, имея соответствующую ориентацию, срезаются, другие разрушаются отрывом с образованием мельчайших трещин.

Геометрия неровностей тесно связана с физико-механическими процессами разрушения металла при обработке резанием. Так, шероховатость поверхности при обработке хрупких металлов представляется в виде треугольных углублений, отвечающих форме вырванных зерен; в вязких металлах при больших скоростях резания сильно деформированные неровности имеют форму чешуек.

Величина шероховатости обрабатываемой поверхности зависит от вида обработки, рода обрабатываемого материала, степени пластической деформации его при резании, режима резания, геометрии режущего инструмента, охлаждения и других факторов.

Основными технологическими факторами, определяющими шероховатость поверхности, являются:

- подача, скорость и глубина резания, радиус закругления вершины резца при обработке резанием металлическим инструментом;
- зернистость шлифовального круга, продольная и поперечная подача, скорость вращения круга и детали при обработке абразивным инструментом.
- подача, скорость вращения детали, глубина натяга, радиус индентора при обработке деформирующим инструментом.

Технологическое обеспечение шероховатости поверхности базируется в основном на экспериментальном изучении зависимостей между методом окончательной обработки и параметрами шероховатости (табл. Прил. Б-Д).

Достигаемая при определенном методе обработки шероховатость прежде всего характеризуется высотными методами  $R_a$ ,  $R_z$  или  $R_{max}$ . Однако поверхности с одинаковой высотой неровностей, но полученные различными технологическими методами, могут иметь различные эксплуатационные свойства, например по-разному сопротивляться действию сил, стремящихся деформировать выступы. Такие поверхности прежде всего могут различаться опорными (несущими) площадями (длинами). Оценка по опорной длине

профиля не дает достаточно полного представления об опорной площади, так как шероховатость поверхности в поперечном и продольном направлениях различна и не связана постоянным соотношением. Поэтому для полной оценки несущих площадей нужна топография поверхности /СТМ/.

С уменьшением высоты поперечных микронеровностей высота продольной и поперечной шероховатостей становится примерно одинаковой. Наибольшее различие наблюдается при грубой обработке, когда продольная высота составляет малую долю от поперечной. Указанное различие зависит не только от вида обработки, но и от материала. Продольные неровности при обработке стальных деталей имеют наибольшее значение, например, при плоском и круглом шлифовании периферией круга, а при обработке чугуновых деталей — при строгании, цилиндрическом фрезеровании, доводке цилиндрических поверхностей.

В некоторых случаях при механической обработке продольная шероховатость может превышать поперечную (например, при резании с образованием нароста на режущей кромке инструмента); наличие или отсутствие вибрации также заметнее сказывается на продольной шероховатости, чем на поперечной. Следовательно, при оценке опорной площади необходимо учитывать отличия шероховатости в различных направлениях (микротопографию поверхности).

Абсолютные значения опорной площади поверхностей зависят не только от шероховатости, но и от метода обработки. Поверхность с малой шероховатостью по сравнению с поверхностью с более высокой шероховатостью, но полученной другим методом обработки, не всегда имеет большую опорную площадь. Поэтому для обеспечения определенной опорной (несущей) площади данной детали необходимо наряду с назначением высотного параметра шероховатости указывать технологический метод получения поверхности и этап обработки (рис. 4.2).

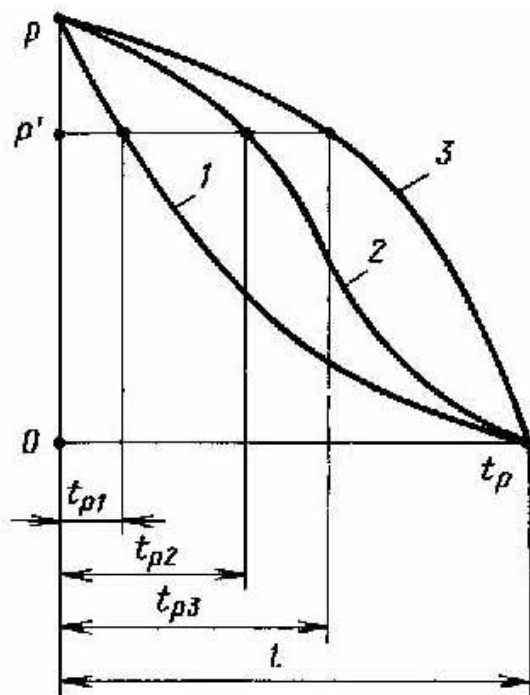


Рис. 4.2. Кривые относительных опорных длин профилей  $t_p$  при одинаковых уровнях сечения  $\rho$ : 1 – при черновой обработке; 2 – при чистовой обработке; 3 – при обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД)

Наибольший практический интерес представляет начальная часть опорной кривой профиля, которая описывается формулой

$$t_p = b = b' \varepsilon^v \quad (4.1)$$

где  $b$  и  $v$  — параметры аппроксимации начальной части опорной кривой профиля.

Эта формула справедлива в пределах  $0 < t_p \leq 0,5$ . Параметры  $b$  и  $v$  могут быть определены несколькими методами: графически, что требует построения опорной кривой профиля, и аналитически по соответствующим зависимостям. Изучение верхних участков шероховатых поверхностей позволило установить значения параметров  $b$  и  $v$ , характеризующих начальную часть опорных кривых (опорную площадь). Для основных технологических методов обработки они позволяют выполнить ориентировочные расчеты для определения опорной площади шероховатых поверхностей, обработанных резанием (Приложение Г) /24/.

Опорная площадь может оказаться одинаковой для нескольких поверхностей, обработанных различными методами. Отличие таких поверхностей устанавливают по геометрическим характеристикам отдельных микронеровностей: каждому методу обработки соответствует определенный диапазон изменения углов профиля и радиусов закругления выступов в зависимости от высоты шероховатости поверхностей. В преобладающем большинстве случаев радиус  $r_{пр}$ , закругления вершин микронеровностей в продольном направлении превышает радиус  $r_n$  закругления в поперечном направлении. Угол  $\beta_n$  профиля микронеровности для поперечного направления больше чем угол  $\beta_{пр}$  для продольного. С уменьшением высоты неровностей

наблюдается общая тенденция к уменьшению углов профиля и соответствующему увеличению радиусов закругления выступов.

Геометрические характеристики микронеровностей, высота неровностей, их шаги связаны между собой. С уменьшением высоты неровностей при каждом методе обработки возрастает соотношение между шагом неровностей профиля  $S$  и высотой  $R_{\max}$ . Для большинства методов механической обработки при средней высоте неровностей поверхностей шаг  $S_{\perp}$  поперечной шероховатости не превышает  $40R_{\max}$  (шлифование, точение, строгание, фрезерование, растачивание стальных и чугунных деталей). Для неровностей меньшей высоты их шаги могут достигать почти  $300R_{\max}$ . Шаг  $S_{\parallel}$  продольной шероховатости обычно превышает шаг поперечной шероховатости. Отношение этих величин в большинстве случаев не превышает 15, хотя в отдельных случаях достигает 40. Абсолютные значения шага продольных неровностей достигают  $800R_{\max}$ . Следовательно, чем больше радиусы закругления выступов, тем меньше углы профиля и больше размеры оснований отдельных неровностей и их шаг (при определенной высоте шероховатостей). Значения приведенного радиуса закругления выступов и отношения  $r/R_{\max}$  для различных методов обработки резанием даны в приложении В.

При необходимости получения более точных значений, характеризующих опорную площадь и другие геометрические параметры качества поверхности деталей, учитывают конкретные условия выполнения для технологической операции (материал обрабатываемой детали, получаемую шероховатость при определенных режимах обработки, материал инструмента и т. д.). При этом во многих случаях целесообразно также учитывать технологическую наследственность.

Применение СОТС способствует улучшению процесса стружкообразования, что приводит к уменьшению износа, а следовательно, повышению стойкости инструмента, и к уменьшению силы резания. В результате уменьшается величина упругих отжатий элементов технологической системы, а следовательно, улучшается шероховатость, снижается волнистость, увеличивается точность обрабатываемых поверхностей деталей машин.

В качестве СОТС используют растительные и осерненные минеральные масла - сульфифрезолы, эмульсии, которые снижают шероховатость обрабатываемых поверхностей на 25...40 %, по сравнению с обработкой без охлаждения.

Тщательная очистка и фильтрация СОТС, с целью удаления абразива и стружки, также способствуют улучшению шероховатости при шлифовании и

других способах абразивной отделочной обработки - суперфинише, хонинговании.

В таблице (Приложение Г) приведены эмпирические зависимости для определения параметров шероховатости при различных методах и условиях обработки поверхностей.

Волнистость в процессе механической обработки поверхности образуется главным образом в связи с вибрацией из-за недостаточной жесткости технологической системы (Прил. Д, Е). Вообще говоря, волнистость может образовываться на детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях: продольная и поперечная волнистость. Если первая обычно возникает в результате вибрации технологической системы, то вторая вызывается неравномерностью подачи, неправильной правкой шлифовального круга, неравномерностью его износа и т. д. В любом случае волнистость определяется условиями выполнения технологического процесса и метода обработки. Наличие волн на поверхности приводит к уменьшению опорной площади в 5—10 раз по сравнению с ровной шероховатой поверхностью.

Физико-механические свойства. Поверхностный слой детали после механической обработки пластически деформирован. Поэтому физическое состояние поверхностного слоя после механической обработки в основном характеризуется деформационными изменениями в нем, следствием которых и является его деформационное упрочнение (наклеп) или разупрочнение (отдых, возврат) (Прил. Ж). При упрочнении повышаются предел прочности, твердость, снижается пластичность, изменяются другие физические свойства металла. Наклеп способствует повышению износостойкости, усталостной прочности, контактной усталости. Существует оптимальное значение микротвердости для конкретных условий.

У стальных деталей в образующемся в результате лезвийной обработки поверхностном пластически деформированном слое могут различаться три зоны (рис. 4.3):

1. Зона резко выраженной деформации - дефектный слой с измельченным зерном, значительными искажениями кристаллической решетки, деформированной структурой, наличием механических повреждений с резким повышением твердости материала.

2. Зона деформации с характерной текстурой: вытянутыми в направлении рабочего движения инструмента зернами; наволакиванием одних зерен на другие. Твердость материала в этой зоне заметно снижается по сравнению с прилегающей к поверхности.

3. Зона перехода от наклепа к исходному материалу.

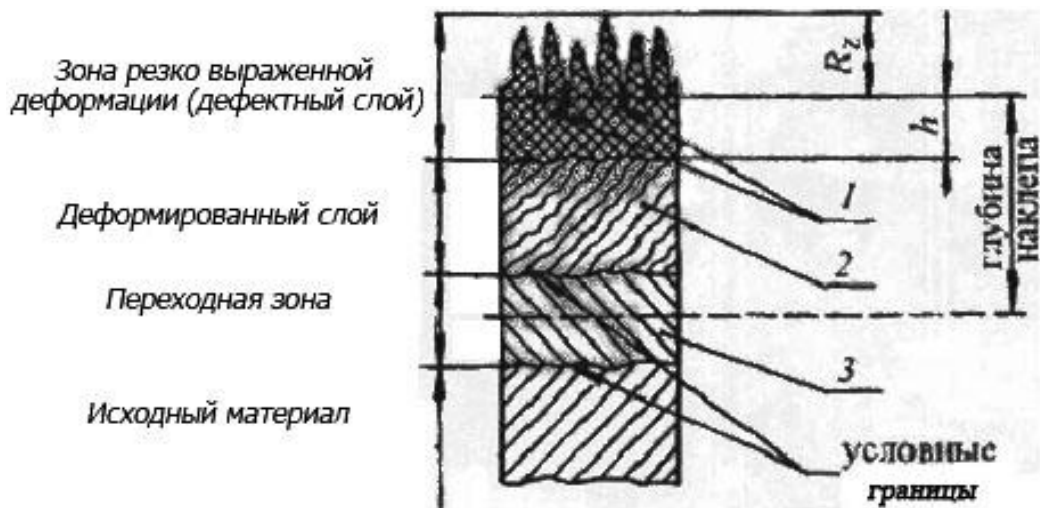


Рис. 4.3. Структура поверхностного слоя обработанной поверхности: 1 - зона резко выраженной деформации, (дефектный слой); 2 - деформированный слой (собственно наклеп); 3 - переходной слой;  $h$  - глубина дефектного слоя .

Деформационное упрочнение (разупрочнение) поверхностного слоя зависит от режимов резания, геометрии режущего инструмента, его износа и других условий обработки. Глубина залегания упрочненного слоя и степень наклепа тем выше, чем больше величина сил, продолжительность их воздействия и интенсивность пластической деформации металла. Одновременно с процессом упрочнения протекает противоположный ему процесс разупрочнения, который стремится вернуть металл поверхностного слоя в исходное, ненаклепанное состояние. Интенсивность процесса разупрочнения полностью определяется значением температуры и временем ее воздействия на металл поверхностного слоя. Если режим резания или другие условия обработки изменяются таким образом, что количество теплоты, генерируемой в зоне резания, возрастает, то следует ожидать уменьшения степени и глубины наклепанного слоя. При высокой температуре в зоне резания и достаточно продолжительном ее воздействии процесс разупрочнения может быть настолько интенсивным, что наклеп в поверхностном слое полностью снимается.

Степень и глубина упрочнения зависят от целого ряда параметров обработки, в том числе от скорости резания, подачи, геометрии инструмента, величины его износа. По мере увеличения (до определенных пределов) скорости резания глубина наклепа возрастает. При высоких скоростях (200 — 600 м/мин) возникает явление разупрочнения, которое уменьшает глубину наклепа. При обработке деталей из легированных и высокопрочных сталей, имеющих низкие пластические свойства, остаточные напряжения сжатия образуются при скоростях резания 400— 600 м/мин. При обработке деталей из конструкционных сталей 20 и 45 остаточные напряжения сжатия возникают при скоростях резания

500—800 м/мин и отрицательных передних углах. При точении сплава ЭИ437А с увеличением скорости резания от 2 до 5 м/мин глубина наклепанного слоя уменьшается от 141 до 97 мкм, а степень наклепа от 50 до 35%. Это связано с тем, что с увеличением скорости резания повышаются температура на поверхности детали и скорость деформирования. В то же время если материал не склонен к наростообразованию, то при этом непрерывно снижаются усилия резания и степень деформирования срезаемого слоя. Эти факторы способствуют уже снижению как глубины, так и степени наклепа.

При увеличении подачи возрастают глубина наклепа и остаточные напряжения. Глубина резания не оказывает существенного влияния на глубину наклепа.

Поверхностный слой детали после механической обработки находится в напряженном состоянии. В нем возникают остаточные растягивающие или сжимающие напряжения. Величина, знак и закономерность распределения напряжений зависят от свойств обрабатываемого материала, методов и режимов обработки. Величина и знак остаточных напряжений оказывают влияние на усталостную прочность, предел выносливости. В большинстве случаев благоприятными являются сжимающие остаточные напряжения.

Применение инструментов с отрицательными передними углами от  $15^0$  до  $45^0$  способствует образованию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия. При увеличении заднего угла в пределах  $3—15^0$  глубина наклепа уменьшается. При уменьшении главного угла в плане от  $90$  до  $45^0$  глубина наклепа снижается. Применение тщательно доведенного инструмента способствует уменьшению глубины наклепа. Увеличение радиуса скругления режущей кромки способствует возрастанию глубины наклепа и остаточных напряжений.

С повышением твердости обрабатываемого материала уменьшается объем, подвергаемый пластической деформации. Чем мягче сталь, тем глубже распространяется пластическая деформация.

**Остаточные напряжения.** После механической обработки (точения, фрезерования, шлифования и др.) могут возникать значительные остаточные напряжения. Особенность этих остаточных напряжений состоит в том, что они действуют практически только в поверхностных слоях глубиной в несколько десятых долей миллиметра. Возникновение остаточных напряжений связано с пластической деформацией при воздействии режущего инструмента и с нагреванием поверхностных слоев выделяющейся теплотой резания. При силовом воздействии инструмента возникает пластическая деформация растяжения, и после снятия этого воздействия в поверхностном слое образуются остаточные напряжения сжатия.

Пластическая деформация металла вызывает уменьшение его плотности, а следовательно, обуславливает рост удельного объема, достигающего 0,3-0,8% удельного объема до пластической деформации. Это увеличение объема распространяется на глубину проникновения пластической деформации. Увеличению объема пластически деформированного металла препятствуют нижележащие слои. В результате этого в наружном слое возникают сжимающие, а в нижележащих слоях - растягивающие остаточные напряжения (рис. 4.4).

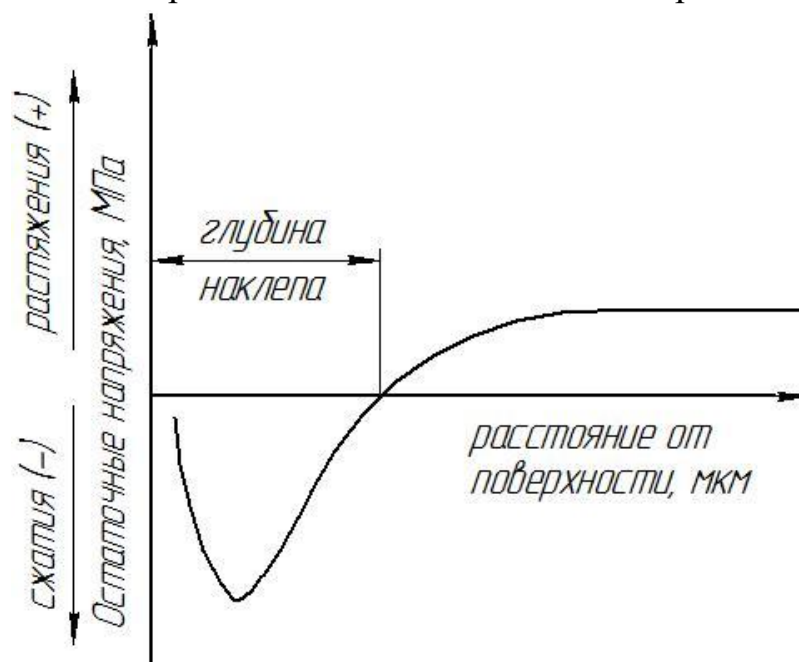


Рис. 4.4 Характерная эпюра остаточных напряжений в поверхностном слое.

Кроме того, режущий инструмент вытягивает кристаллические зерна слоя металла под режущим клином в направлении резания. После прекращения резания и удаления режущего инструмента пластически растянутые верхние слои, связанные как единое целое с нижележащими слоями, приобретают остаточные напряжения сжатия, ориентированные по направлению резания. Соответственно этому в нижележащих слоях развиваются уравнивающие их остаточные напряжения растяжения. В направлении подачи протекают аналогичные процессы, вызывающие возникновение осевых остаточных напряжений.

Выделение тепла в процессе резания (вследствие, работы деформации и трения) приводит к большим температурным градиентам и температурным напряжениям, которые могут превосходить предел текучести материала. После установления нормальной температуры в поверхностных слоях детали происходит деформация сжатия. Этому препятствуют нижележащие слои. В результате в поверхностных слоях появляются растягивающие остаточные

напряжения, а в нижележащих - напряжения сжатия, уравнивающие растягивающие напряжения.

Таким образом, сочетание двух основных факторов при резании - силового и температурного - действуют в противоположные стороны, что и объясняет существенную зависимость величины и знака остаточных напряжений от технологического режима обработки. Например, остаточные напряжения при точении зависят от скорости резания и подачи, величины переднего угла резца, затупления резца, условий охлаждения, а также от механических свойств материала обрабатываемой детали. При обработке лезвийным инструментом - точении, фрезеровании, строгании и т. п. в зоне обработки доминирует силовой фактор, особенно это характерно для черновых этапов обработки. Окончательная величина и знак остаточных напряжений после точения зависят от степени воздействия каждой из причин, участвующих в формировании напряжений.

Влияние скорости резания при точении проявляется в изменении теплового воздействия и в изменении продолжительности теплового и силового воздействия на металл инструмента. Поэтому повышение скорости резания при точении способствует появлению дополнительных растягивающих напряжений, которые увеличивают общую величину остаточных напряжений растяжения. Остаточные напряжения достигают величины 20-80 кг/мм<sup>2</sup> (как сжимающие, так и растягивающие) и залегают на глубине 50-100 мкм. При обработке малопластичных материалов, при которой формируются остаточные напряжения сжатия, повышение скорости резания приводит к уменьшению сжимающих и даже образованию растягивающих напряжений. При обработке пластичных материалов, воспринимающих закалку, увеличение количества теплоты в зоне резания, связанное с повышением скорости резания, может привести к закалке поверхностного слоя. Увеличение удельного объема металла поверхностного слоя при его закалке приводит к снижению остаточных напряжений растяжения, формирующихся при малых скоростях, и превращению их в напряжения сжатия при обработке на больших скоростях резания. При точении закаленных материалов увеличение нагревания поверхностного слоя при увеличении скорости резания может вызвать отпуск. Вследствие отпуска происходят структурные изменения, связанные с уменьшением удельного объема металла, что приводит к снижению остаточных напряжений сжатия. Увеличение подачи при обработке пластичных сталей, например, жаропрочных, у которых формируются остаточные растягивающие напряжения, приводит к росту пластической деформации поверхностного слоя и соответствующему росту остаточных напряжений растяжения. При точении малопластичных материалов увеличение подачи вызывает увеличение остаточных напряжений сжатия, а при

обработке малопластичных закаленных сталей - их снижение. Возрастанию остаточных напряжений сжатия при точении малопластичных сталей способствует также увеличение отрицательных значений передних углов резца.

При отрицательном переднем угле и больших скоростях резания ( $V > 300$  м/мин) получают сжимающие остаточные напряжения у поверхности. При некоторых условиях скоростного резания (с большими отрицательными углами) у сталей хорошо воспринимающих закалку, в поверхностном слое наблюдается переход аустенита в мартенсит. Такой переход, сопровождающийся увеличением объема, соответствует образованию сжимающих остаточных напряжений и компенсирует влияние теплового фактора.

Износ резца приводит к увеличению пластической деформации поверхностного слоя металла и глубины ее проникновения. Поэтому при точении пластичных материалов происходит увеличение остаточных напряжений растяжения, а при точении малопластичных материалов - увеличение сжимающих напряжений.

В процессе шлифования решающее влияние на образование остаточных напряжений оказывает тепловой фактор. Поэтому в поверхностном слое в процессе шлифования возникают сжимающие температурные напряжения. Указанные напряжения превосходят предел текучести материала и вызывают пластическую деформацию сжатия. После окончания процесса шлифования и установления нормальной температуры эта деформация сохраняется, что приводит к растяжению поверхности со стороны внутренних слоев, т.е. к образованию растягивающих остаточных напряжений. Пластическая деформация, связанная с усилием резания, при шлифовании имеет второстепенное значение. Изменение условий шлифования, приводящее к повышению температуры резания, приводит к росту остаточных напряжений растяжения или снижению остаточных напряжений сжатия.

Для ряда марок сталей, особенно высоколегированных, при охлаждении образуется поверхностный мартенситный слой (белый слой толщиной 0,01—0,3 мм). Мартенситное превращение происходит при увеличении объема, что может компенсировать уменьшение объема при пластической деформации сжатия. Указанное обстоятельство может привести к образованию остаточных напряжений сжатия. Однако в практических случаях влияние температурных деформаций сказывается больше, и после шлифования и в поверхностном слое наблюдаются растягивающие остаточные напряжения.

На основании ряда экспериментальных исследований можно считать, что после шлифования в поверхностных слоях возникают растягивающие остаточные напряжения 40...80 кГ/мм<sup>2</sup> (на глубине 20...50 мкм). При ленточном шлифовании жаропрочных сплавов в поверхностных слоях создаются

сжимающие остаточные напряжения порядка  $40...50 \text{ кГ/мм}^2$ , при ручном полировании -  $40...60 \text{ кГ/мм}^2$ . Для снятия остаточных напряжений в жаропрочных сплавах применяется специальный отжиг.

Остаточные напряжения также возрастают при увеличении сопротивления деформации при повышении твердости.

В заготовке, поступающей на металлорежущий станок, имеются внутренние напряжения, которые сохраняются при отсутствии внешних сил и потому называются остаточными. При механической обработке, когда с заготовки в виде припуска удаляют часть металла, происходит перераспределение внутренних остаточных напряжений, их временное равновесие нарушается. Основную роль здесь играют напряжения первого рода. Величина и характер распределения остаточных напряжений зависят от конфигурации заготовки, ее габаритных размеров и соотношения размеров отдельных элементов, способа получения исходной заготовки и других факторов. Большие остаточные напряжения возникают в исходных заготовках, получаемых литьем, ковкой, штамповкой, из-за неравномерного охлаждения разных элементов заготовки. В сварных, сварно-литых, сварно-штампованных конструкциях наибольшие внутренние напряжения возникают в местах сварки, где из-за местного нагрева и охлаждения происходят неоднородные объемные изменения. Структурные превращения металла и диффузионные процессы при сварке также способствуют появлению остаточных напряжений различного рода. В особо неблагоприятных случаях остаточные напряжения могут вызвать не только значительное нарушение формы заготовки - коробление, изогнутость и другое, но и трещины.

Перераспределение внутренних напряжений происходит не сразу, а постепенно, и также постепенно происходит изменение формы заготовки и готовой детали. В практике бывают случаи, когда исходная заготовка, получившая большие остаточные напряжения, проходит черновую обработку. Частично перераспределяются внутренние напряжения и деформация заготовки. Получившиеся при этом искажения формы устраняют при чистовой обработке. Готовую деталь, если она годная, ставят на машину, а через некоторое время уже при эксплуатации выясняется, что деталь быстро изнашивается, причина этого - ее деформация, которая произошла после того, как деталь полностью обработали.

Самый простой путь устранения внутренних напряжений - разделение обработки резанием на несколько этапов. На первом этапе выполняют черновую обработку, удаляя наибольшую часть припуска с поверхностей заготовки. Затем передают заготовку на получистовую обработку и заканчивают изготовление детали на третьем этапе - чистовой обработке. Так как обычно заготовки

обрабатывают партиями, а черновую, получистовую и чистовую обработки ведут на разных станках, а иногда и в разных цехах, то между черновой и получистовой обработками проходит определенное время. За это время происходит в основном перераспределение внутренних напряжений и деформация заготовки. Чем больше промежуток времени между черновой и чистовой обработками, тем меньше опасность искажения формы готовой детали.

Для мелких и средних отливок эффективным способом снятия внутренних напряжений является искусственное старение - специальный процесс термической обработки. Отливку помещают в печь, нагревают до температуры 500-600° С и выдерживают в течение 1-6 ч (чем крупнее отливка, тем больше выдержка). Затем отливку медленно охлаждают вместе с печью таким образом, чтобы все части отливки (тонкие и толстые) охлаждались равномерно. Скорость охлаждения составляет 25-75 град/ч. Когда температура отливки снизится до 200-250° С, ее вынимают из печи и окончательно охлаждают на воздухе.

Для снятия напряжений, полученных при ковке, штамповке и литье, применяют также отжиг - нагрев до температуры 400 - 600°С с выдержкой 2,5 мин на 1 мм толщины сечения заготовки, а для сварных заготовок - высокотемпературный отпуск с нагревом до 600-650° С. Отжигают также заготовки, получаемые из проката. Вследствие больших пластических деформаций при прокатке в поверхностных слоях заготовок образуются значительные растягивающие, а во внутренних слоях сжимающие напряжения. Если с такой заготовки снимать неравномерный припуск, то ее форма из-за перераспределения внутренних напряжений может измениться. Поэтому, например, после фрезерования длинных шпоночных канавок на валах, изготавливаемых из проката, может происходить искривление вала. Для исправления кривизны заготовок валов, осей, стержней, длинных планок и т.д. их правят в холодном состоянии. В процессе правки происходит упругая, а затем пластическая деформация.

Тщательная правка позволяет почти полностью устранить кривизну заготовки, вызванную действием остаточных напряжений. Но при правке в заготовке появляются новые напряжения. При дальнейшей чистовой обработке (а еще хуже - в работающей машине) эти остаточные напряжения могут вызвать новые искажения формы, поэтому для ответственных деталей правку применять нежелательно.

Состав смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), способы их подвода в зону резания оказывают также влияние на величину и знак макронапряжений, возникающих в поверхностных слоях деталей, обработанных резанием. Применение СОТС вносит соответствующие изменения в физико-химические процессы, протекающие в зоне контакта инструмента с

обрабатываемой поверхностью, обуславливающие напряженное состояние поверхностных слоев. Одни и те же среды, в зависимости от метода и условий обработки, оказывают неодинаковое влияние на величину и знак остаточных напряжений. Применение СОТС может способствовать как увеличению, так и уменьшению остаточных напряжений по сравнению с обработкой без СОТС. Характер влияния СОТС на технологические макронапряжения в значительной мере зависит от количества тепла, выделяемого в зоне резания, которое определяет развитие процессов разупрочнения в поверхностном слое, а следовательно, влияет и на его напряженность.

#### **4.3 Формирование эксплуатационных свойств поверхности детали нанесением покрытий с использованием высококонцентрированных потоков энергии**

Среди методов нанесения защитных покрытий, основанных на воздействии на поверхность детали потоков частиц и квантов с высокой энергией, большое внимание привлекают вакуумные ионно-плазменные методы. Характерной их чертой является прямое преобразование эклектической энергии в энергию технологического воздействия, основанной на структурно-фазовых превращениях в осажденном на поверхности конденсате или в самом поверхностном слое детали, помещенной в вакуумную камеру.

Основным достоинством данных методов является возможность создания весьма высокого уровня физико-механических свойств материалов в тонких поверхностных слоях, нанесение плотных покрытий из тугоплавких химических соединений, а также алмазоподобных, которые невозможно получить традиционными методами.

Кроме того, эти методы позволяют: обеспечивать высокую адгезию покрытия к подложке; равномерность покрытия по толщине на большой площади; варьировать состав покрытия в широком диапазоне, в пределах одного технологического цикла; получить низкую шероховатость поверхности покрытия; экологическую чистоту производственного цикла. В настоящее время разработано большое число очень высоко эффективных методов нанесения защитных покрытий и модифицирования поверхностных слоев [19].

К методам вакуумной ионно-плазменной технологии относят:

##### **1. Модифицирование поверхностных слоев:**

- ионно-диффузионное насыщение (ионное азотирование, науглероживание, борирование и др.);
- ионное (плазменное) травление (очистка);
- ионная имплантация (внедрение);
- отжиг в тлеющем разряде;

## 2. Нанесение покрытий:

- полимеризация в тлеющем разряде;
- ионное осаждение (триодной распылительной системе, диодной распылительной системе, с использованием разряда в полом катоде);
- электродуговое испарение;
- ионно-кластерный метод;
- катодное распыление (на постоянном токе, высокочастотное);
- химическое осаждение в плазме тлеющего разряда.

Современные вакуумные ионно-плазменные методы упрочнения (модифицирование) поверхностей деталей машин включают следующие этапы:

- генерацию (образование) корпускулярного потока вещества;
- его активизацию, ускорение и фокусировку;
- конденсацию и внедрение в поверхность деталей (подложек).

Генерация корпускулярного потока вещества возможна его испарением (сублимацией) и распылением. Испарение - это переход конденсированной фазы в пар осуществляется в результате подводок тепловой энергии к испаряемому веществу. Твердые вещества обычно при нагревании расплавляются, а затем переходят в газообразное состояние. Некоторые вещества переходят в газообразное состояние минуя жидкую фазу. Такой процесс называется сублимацией.

Нагрев испаряемого вещества может осуществляться:

- за счет выделения джоулева тепла при прохождении электрического тока через испаряемый материал или через испаритель;
- в результате бомбардировки поверхности металла ускоренным потоком электронов (электронно-лучевой нагрев) или квантами электромагнитного излучения (лазерный нагрев);
- высокочастотным электрическим магнитным полем (индукционный нагрев);
- электрической дугой.

Выбор способа нагрева и вид испарения зависят от природы испаряемого материала, его исходной формы (гранулы, порошок, проволока), требуемой скорости испарения, постоянства во времени и т.д. Наибольшее распространение получил нагрев при помощи электронной бомбардировки, что позволяет достигать температуры 4000 градусов Цельсия и высокой плотности энергии в луче. Электронно-лучевой способ нагрева состоит в, что на изделие направляют поток электронов от катода, ускоренных электрическим полем до энергии 5...25 кэВ. Поток электронов (электронный луч) получают с помощью электронно-лучевых пушек.

В результате образования активированного корпускулярного потока в контакт с подложкой металла детали входят нейтральные частицы (возбужденные и невозбужденные) с высокой энергией и ионы. Процесс взаимодействия такого сложного по составу потока с поверхностью металла сводится к протеканию взаимосвязанных физических явлений: конденсации, внедрения и распыления.

**Ионное распыление.** Ионные распылители разделяют на две группы:

- плазменные, в которых мишень находится в газоразрядной плазме, создаваемой с помощью тлеющего, дугового и высокочастотного разряда. Распыление происходит в результате бомбардировки мишени ионами, извлекаемыми из плазмы;
- автономные источники без фокусировки и с фокусировкой ионных пучков, бомбардирующих мишень (заготовку).

В наиболее простом случае система распыления состоит из двух электродов, помещенных в вакуумную камеру (рис. 4.5). Распыляемую мишень из наносимого материала располагают на катоде. На другом электроде на расстоянии в несколько сантиметров от катода, устанавливают детали (подложки). Камеру вакуумируют, наполняют рабочим газом (чаще всего аргоном) до давления 1,33Па, зажигают газоразрядную плазму и бомбардировкой ионами производят очистку изделия от поверхностных загрязнений, далее отрицательный потенциал прикладывают к мишени и распыляют ее. Распыляемые частицы движутся через плазму разряда, осаждаются на деталях и образуют покрытие. Большая часть энергии ионов, бомбардирующих мишень (до 25%) переходит в тепло, которое отводится водой, охлаждающей катод. Основным достоинством способа является возможность получения покрытий из тугоплавких металлов, сплавов и химических соединений.

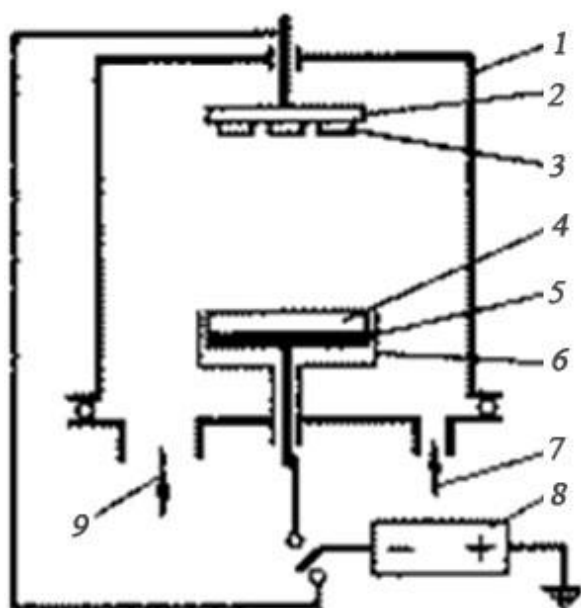


Рис. 4.5. Принципиальная система распыления:

1 – камера; 2 – подложкодержатель; 3 – детали (подложки); 4- мишень; 5- катод; 6- экран; 7 – подвод рабочего газа; 8 – источник питания; 9 – откачка.

**Магнетронное распыление.** Нанесение покрытий в вакууме с помощью магнетронных систем заключается в распылении твердой мишени напыляемого материала ионами инертного газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда при наложении на него магнитного поля, силовые линии которого ортогонально пересекают силовые линии магнитного поля (рис. 4.6) .

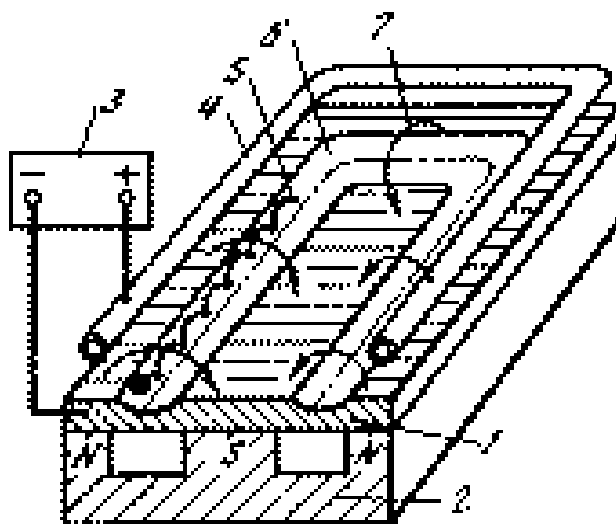


Рис. 4.6. Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью: 1- катод (мишень); 2- магнитная система; 3- источник питания; 4- анод; 5- траектория движения электрона; 6- зона распыления; 7- силовая линия магнитного поля.

Основными элементами магнетрона является катод (мишень), анод и магнитная система. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля к распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем, и им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхностей мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим их на катод, а с другой стороны – поверхностью мишени, их отталкивающей. Электрон циркулирует в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых он потеряет полученную от электрического поля энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадает на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени и росту скорости осаждения покрытия.

**Ионное осаждение покрытий.** Этот способ нашел применение в реновационном производстве для получения износостойких и коррозионностойких покрытий как из чистых металлов, так и из соединений. К методам ионного осаждения покрытий относят методы, в которых осаждаемая пленка подвергается интенсивному воздействию ионного компонента корпускулярного потока, обеспечивающего изменения как в структуре и свойствах детали, так и самого покрытия. Такой результат возможен либо при высокой степени ионизации корпускулярного потока (газообразного или металлического) осаждаемого вещества, либо при высокой энергии ионного компонента корпускулярного потока.

По типу источника генерации металлического компонента потока различают ионно-термические системы распыления и холодные системы. В первых системах перевод переносимого материала из твердого в парообразное состояние осуществляется в результате термического нагрева, во втором - распылением с поверхности интегрально холодной мишени (катода).

Эти методы позволяют получать покрытия с высокими служебными характеристиками кристаллизации пленок и их свойствами.

**Ионно-диффузионное насыщение.** Этот метод наиболее широко применяется при азотировании сталей и металлов. Преимущества перед печами обычного газового азотирования состоит в сокращении длительности цикла в 3...5 раз; уменьшении деформации восстанавливаемых деталей в 3...5 раз; в возможности проведения регулируемых процессов азотирования с получением слоев с заданным составом и структурой; в возможности уменьшения температуры процесса азотирования до 350...400 °С, что позволяет избежать разупрочнения материалы сердцевины изделий; в уменьшении хрупкости слоя и повышении его служебных характеристик; в простоте защиты отдельных участков деталей от азотирования; в устранении опасности взрыва печи; в снижении удельных расходов электрической энергии в 1,5...2 раза и рабочего газа в 30...50 раз; в улучшении условий труда термистов.

Система ионного насыщения представляет собой вакуумную камеру, в электрическом плане реализующую двухэлектродную схему: катод-электрод с деталями; второй электрод (анод) - заземленный корпус вакуумной камеры. Для проведения процесса ионного насыщения в вакуумную камеру подается легирующий материал (элемент или химическое соединение) в газообразном (парообразном) состоянии, а к деталям прикладывается отрицательный потенциал - 300...1000В. Поверхность изделия бомбардируется положительными ионами легирующего элемента из газоразрядной плазмы, что позволяет значительно сократить длительность процесса насыщения

поверхности. К недостаткам метода можно отнести невозможность ускорения процесса путем увеличения плотности ионного потока.

**Ионное легирование (имплантация).** Имплантация существенно снижает износ и трение, увеличивает антикоррозионные свойства металла. При имплантации тонкий поверхностный слой изделия насыщается вносимым элементом, потоком ионов которого поверхность детали обрабатывается (бомбардируется). Имплантированный элемент может входить в кристаллическую решетку основы в виде твердого тела, или образовывать весьма мелкокристаллические выделения химических соединений с компонентами материала основы. Кроме того, при внедрении иона в кристаллической решетке инициируется смещение атомов, приводящих к образованию большого количества дефектов кристаллической решетки. Толщина этого насыщенного дефектами и вследствие этого упрочненного слоя во много раз превышает глубину проникновения ионов. Толщина модифицированного слоя составляет несколько микрон.

#### **4.4 Повышение эксплуатационных свойств деталей машин методами поверхностного пластического деформирования (ППД).**

Сущность ППД заключается в том, что требуемые размеры и качество поверхностей деталей достигается не срезанием материала, а его пластическим формоизменением. В процессе ППД одновременно с обработкой поверхности детали производится её упрочнение, и как следствие значительно улучшаются эксплуатационные свойства детали, повышается их надежность. ППД позволяет эффективно влиять на повышение долговечности деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, трения и воздействия коррозионных сред. Во многих случаях применением ППД удаётся повысить запасы прочности деталей, работающих при переменных нагрузках в 1,5-3 раза, увеличить срок службы в десятки раз.

Любой метод ППД, осуществляемый в рамках технологического маршрута призван обеспечить необходимые действия над заготовкой для получения детали определенного качества. Операции упрочнения методами ППД включают в технологический процесс для решения следующих задач:

- упрочнение поверхности детали при условии получения минимальной шероховатости или заданного микрорельефа;
- упрочнение детали с обеспечением максимального приращения предела выносливости, износостойкости и других эксплуатационных свойств;
- упрочнение поверхности в условиях достижения максимально возможного исправления неточностей размеров и формы детали;

Эти задачи в процессе ППД решаются изменением ряда параметров качества поверхности и свойств материала поверхностного слоя:

- формируется качественно новая макро - и микрогеометрия поверхности;
- в поверхностном слое возникают остаточные макронапряжения сжатия;
- кристаллическая решетка материала поверхностного слоя получает упругопластические искажения, приводящие к формированию остаточных макронапряжений;
- изменяется форма, размеры и ориентировка зерен, что способствует формированию текстурированного слоя;
- в закаленных сталях снижается количество остаточного аустенита и происходит выделение мелкодисперсной карбидной фазы, повышается плотность дислокаций.

Следует отметить, что эффективность упрочнения тесно связана с интенсивностью упругопластической деформации материала поверхностного слоя в процессе ППД. При ППД упругопластическая деформация может быть осуществлена двумя способами воздействия на поверхность детали. Либо твердыми телами, либо концентрированными потоками (полями) энергии.

ППД твердыми телами является наиболее распространенным способом упрочнения. Его осуществляют путем воздействия на обрабатываемую поверхность одного или нескольких обрабатывающих тел. Этот способ ППД лежит в основе целой гаммы методов, которые по характеру силового взаимодействия обрабатывающего тела с обрабатываемой поверхностью можно разделить на две большие группы: квазистатические и динамические (ударные).

Квазистатические предполагают создание деформационного усилия от обрабатывающего тела при его непрерывном контакте с деталью. Условно они отличаются от ударных методов отсутствием инерционных сил при взаимодействии обрабатывающего тела с деталью. При динамических - пластическая деформация поверхностного слоя осуществляется путем многократного ударно-импульсного воздействия обрабатывающих тел энергонесущей среды на обрабатываемую поверхность. В этом случае энергонесущая среда многократно воздействует на все обрабатываемую поверхность или ее часть, при этом сила воздействия обрабатывающих тел  $P$  в каждом цикле изменяется от нуля или от некоторого значения  $P_1$  до максимума, а в случае локального ударного воздействия очаг деформирования может (как и в статических методах) последовательно и равномерно проходить всю обрабатываемую поверхность.

При использовании в технологических целях физико-химических явлений, поверхностная пластическая деформация осуществляется "бесконтактным способом" – путем воздействия на поверхность энергонесущей среды в виде

концентрированного потока энергии. К числу таких методов ППД относятся: обработка в магнитном поле, взрывной волной, электронно-ионной и квантовой технологией, импульсными воздушными струями, барофрагментация. Характер силового воздействия на обрабатываемую поверхность при обработке этой группой методов может быть импульсным и постоянно нарастающим.

Применяемые в практике процессы ППД характеризуются наличием непрерывного или дискретного контакта. Последние, представляющие в основном группу динамических методов обработки твердыми телами, могут быть разделены на процессы с регулярным и со стохастическим формированием локальных очагов деформации (отпечатков). К числу динамических методов ППД, при обработке которыми формирование локальных очагов деформации носит регулярный характер, относятся методы обработки единичным индентором или набором инденторов. Основную группу ударных методов ППД составляют методы обработки свободно движущимися телами. Они обладают высокой деформирующей способностью, регулируемой в широких пределах энергией удара, а также пригодностью для обработки разнообразных по форме поверхностей и т.д. Стохастический характер формирования лежит в основе динамических методов обработки направленным потоком, порционными массами и с соударением частиц энергонесущей среды.

При обработке деталей свободно движущимися телами, поверхностное пластическое деформирование осуществляется в результате ударно-импульсного воздействия на обрабатываемую поверхность отдельных обрабатывающих тел, в качестве которых может быть использована стальная, чугунная, стеклянная или изготовленная из материала детали дробь различной формы, типа и размера. Применяемые для обработки деталей свободно движущимися телами установки отличаются друг от друга способом подвода энергонесущей среды в зону обработки, расходом обрабатывающих тел и СОТС в единицу времени и другими конструктивными параметрами.

Интенсивность упрочнения детали при применении методов ППД, также зависит от схемы обработки поверхностей, определяемой кинематикой относительного движения: для квазистатических методов – инструмента и детали, для динамических методов – энергонесущей среды и детали.

Таким образом, операции упрочнения ППД в общем случае определяются четырьмя основными признаками:

- 1) технологическим назначением;
- 2) методом ППД – определяющим характер силового воздействия обрабатывающих тел или энергонесущей среды на обрабатываемую поверхность;
- 3) схемой обработки детали;

4) типом или видом обрабатываемых тел.

Обработка ППД сопровождается сложными структурными и фазовыми превращениями, характерными для формирования поверхностного слоя. В первоначальный момент, деформирование в области плоскостей скольжения происходят искажение кристаллической решетки, в частности ее поворот, а также смещение атомов из положения устойчивого равновесия и упругие искривления плоскостей скольжения. Эти искажения вызывают появление дополнительных напряжений, остающихся после прекращения нагружения (напряжения третьего рода).

При деформации поликристалла, состоящего из большого числа зерен, имеющих различную ориентацию кристаллографических плоскостей, отдельные зерна воздействуют друг на друга, вызывая появление внутренних напряжений. При этом одни зерна испытывают напряжения растяжения — сжатия, другие — изгиба, в одних зернах эти напряжения больше, в других меньше. Деформация более напряженных зерен сдерживается соседними, менее напряженными. В результате первые приобретают внутренние напряжения сжатия, а вторые — растяжения. После снятия внешних нагрузок внутренние напряжения между отдельными зернами поликристалла сохраняются в нем (остаточные напряжения второго рода — межкристаллитные). С увеличением разницы в размерах зерен поликристалла неоднородность напряженного состояния усиливается.

Скольжение в кристаллах уменьшает структурные неоднородности. Устранение же неоднородностей частично восстанавливает реальную прочность кристаллов и повышает величину критического напряжения сдвига. Полосы скольжения разделяют кристалл на мелкие части в виде пластинок, превращая его в поликристалл, состоящий из мелких вытянутых зерен. Измельчение зерен поликристалла усиливает эффект блокирования плоскостей скольжения одного зерна соседними зернами, с другой ориентацией кристаллической решетки, поэтому скольжение, начавшееся в одном зерне, не может свободно развиваться далее и тормозится соседними зернами.

В процессе скольжения происходит вытягивание зерен поликристалла в направлении деформации, в результате чего создается определенная ориентировка тонких вытянутых зерен (текстура деформации). Увеличивается действие поверхностных сил на границах зерен, что повышает прочность поликристаллов. Далее вследствие усиления развития сдвигов по плоскостям скольжения образуются новые, значительно измельченные зерна. При этом кристаллиты теряют свою глобоидную форму, сплюсчиваются, вытягиваются в направлении деформирования. Резко изменяется соотношение их размеров, образуется упорядоченная ориентированная структура волокнистого характера с

анизотропными механическими свойствами, когда пластичность вдоль волокон выше, чем в поперечном направлении.

При скольжении одной части кристалла относительно другой на плоскостях скольжения возникают осколки зерен, создающие шероховатость поверхностей скольжения, которая тормозит дальнейшее перемещение.

Изменение формы кристаллических зерен в процессе деформации способствует их механическому сцеплению и затрудняет взаимное перемещение, наблюдающееся при пластической деформации поликристаллов. Совокупность перечисленных явлений вызывает общее упрочнение деформируемого металла.

С увеличением плотности дислокаций уменьшается расстояние между ними, а это приводит к усилению взаимодействия их между собой и другими дефектами решетки. Сопротивление движению дислокаций возрастает, а следовательно, возрастает и сопротивление деформации, т.е. прочность металла увеличивается. Решетка по данным [17] вокруг дефектов искажена, её строение нарушено. Поэтому атомам и участку решетки вокруг дефектов, в целом, свойственна повышенная потенциальная энергия. Это означает, что при сближении дислокаций (например, при деформации) друг с другом возможны два случая:

1) при взаимодействии дислокаций между собой (или с другим дефектом) имеет место увеличение искажений кристаллической решетки. В этом случае сопротивление деформации возрастает, что будет означать повышение прочности металла;

2) при взаимодействии дислокаций (или других дефектов) между собой может иметь место уменьшение искажений кристаллической решетки. В этом случае сопротивление деформации уменьшится, т.е. металл разупрочнится.

Основной причиной упрочнения является лавиноподобное развитие дислокаций — дефектов кристаллической решетки металла, скапливающихся вблизи линий сдвигов, и последующее застревание перед различного рода препятствиями, образующимися в процессе деформирования или существовавшими до него. При деформировании перенасыщенных твердых растворов частично происходит их распад, в результате которого выделяются мельчайшие частицы новых структурных образований. Последние, выделяясь на плоскости скольжения, блокируют развитие сдвигов. При деформировании сталей с феррито-перлитной структурой распадается твердый раствор  $\alpha$ -железа и углерода, роль «шипов» играют карбиды железа, выделяющиеся в виде очень мелких карбидных включений. Возможно и выпадение соединений азота — нитридов. Увеличение твердости при пластическом деформировании сталей со структурой мартенсита закалки объясняется частичным превращением остаточного аустенита в мартенсит.

Установлено, что интенсивность упрочнения сталей тем выше, чем мягче сталь. У незакаленных сталей в результате поверхностного деформирования можно получить увеличение твердости более чем на 100%, а у закаленных - только на 10-15%. Прирост твердости определяется структурой деформируемой стали. Наибольшее повышение твердости наблюдается у сталей с аустенитной, ферритной и мартенситной структурами, наименьшее – с перлитной и сорбитной структурами. Абсолютный прирост твердости в результате составляет: для мартенситных структур - 180-320НВ; для сталей, содержащих избыточный феррит - 60-120НВ. Это связано с тем, что структурные составляющие имеют различную способность к упрочнению.

Для структуры мартенсита глубина упрочненной зоны больше, чем при тех же условиях для других структур. Структуры сорбита имеют наименьшую глубину пластически деформированного слоя (рис. 4.7).

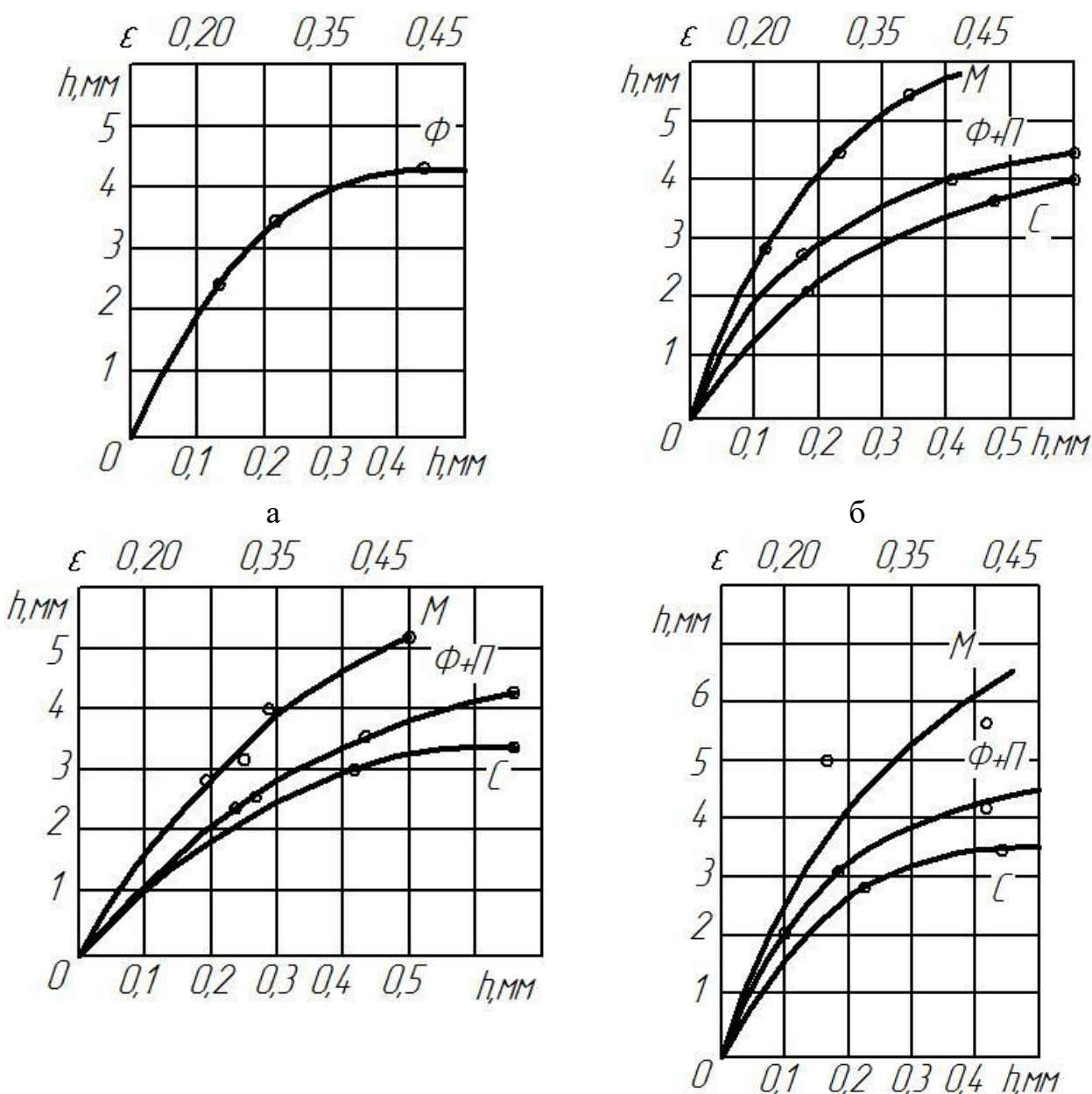


Рис. 4.7. Зависимость глубины пластически деформируемой зоны  $h$  от глубины отпечатка  $h_1$  для углеродистых сталей с различными структурами: а – армкожелезо; б – сталь 35; в – сталь 45; г – сталь 50; Ф – феррит; М – мартенсит; П – перлит; С – сорбит.

Деформационное упрочнение характеризуется увеличением пределов текучести, твердости, хрупкости и снижением пластичности. Претерпевают изменения ползучесть, внутреннее трение, электросопротивление, коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, остаточная индукция. Эти изменения физико-механических свойств поверхностного слоя металла зависят от степени пластической деформации, и их необходимо учитывать при выборе режимов ППД для деталей различного назначения.

Увеличение концентрации точечных и линейных дефектов кристаллического строения и образование субмикроскопических (неопасных и неопасных) трещин также увеличивает удельный объем металла. Суммарное максимальное увеличение удельного объема для сталей достигает 1,1%. Это обуславливает образование в пластически деформированной зоне остаточных напряжений сжатия, которые в зависимости от материала и метода обработки достигают 1200-1500 МПа; глубина залегания напряжений обычно на 10-15% превышает глубину слоя с повышенной твердостью. Максимальное напряжение чаще всего непосредственно на поверхности или на некотором расстоянии от поверхности, что обусловлено тепловыми явлениями в процессе ППД. При использовании в процессе ППД СОТС, подслоный максимум практически исчезает [16].

Характер распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя, как правило, имеет вид представленный на рис. 4.8. Различные технологические режимы влияют на глубину залегания остаточных напряжений, которая увеличивается пропорционально росту размеров пластического отпечатка. На интенсивность сжимающих напряжений, основное влияние оказывает скорость пластической деформации и продолжительность обработки.

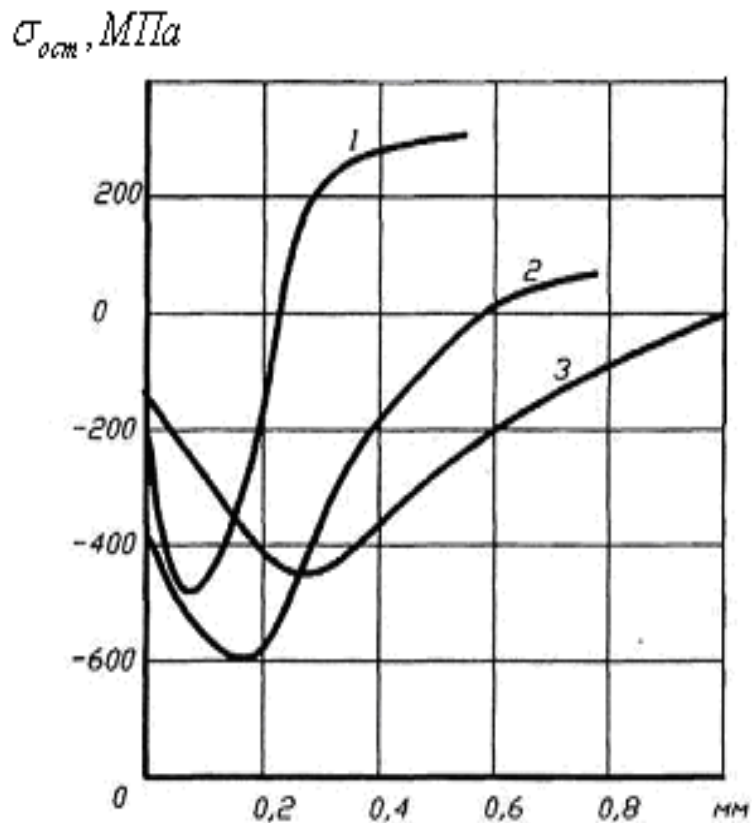


Рис. 4.8. Эпюры остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя в образцах из стали 18Х2Н4ВА после: 1- дробеструиной обработки; 2- центробежно-шариковой обработки; 3- раскатывания.

Форма кривой распределения микротвердости по глубине упрочненного в процессе ППД поверхностного слоя до некоторого момента не имеет подслоного максимума (Рис. 4.9). Зависимость глубины и интенсивности прироста микротвердости от технологических режимов практически такая же, как и для остаточных сжимающих напряжений. Но при длительном времени упрочнения рост микротвердости на поверхности прекращается. Несмотря на дальнейший рост микротвердости под поверхностью, явление поверхностного переупрочнения отрицательно сказывается на контактной выносливости и усталостной прочности деталей.

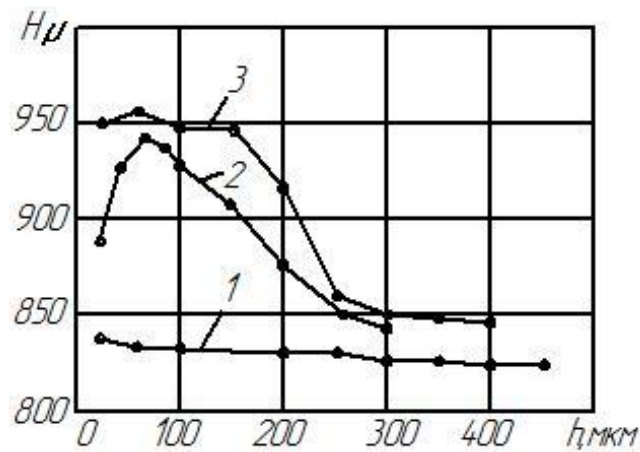


Рис. 4.9. Изменение микротвердости эвольвенты зуба шестерни из стали 20Х3ВМФ в зависимости от продолжительности обработки. Обрабатывающая среда смесь стальных и твердосплавных шаров: 1 – исходная; 2 –  $T=300$  мин; 3 –  $T=180$  мин.

На рис. 4.10 приводятся кривые усталости для образцов упрочненных разными методами ППД.

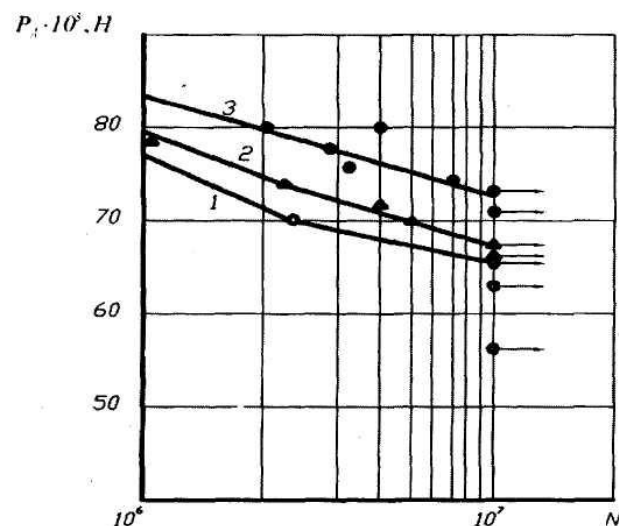


Рис. 4.10 Результаты испытаний на усталость образцов из стали 19Х2Н4ВА после: 1 – дробеструйной обработки; 2 – центробежно-шариковой обработки; 3 – раскатывания.

Сопоставление кривых, представленных на Рис. 4.8-4.10 позволяет сделать вывод, что увеличение предела усталости определяется не столько методом ППД, сколько технологическими режимами, обуславливающими увеличение глубины и интенсивности пластически деформированного поверхностного слоя.

Процесс обработки деталей методами ППД сопровождается выделением теплоты, которая нагревает обрабатываемую деталь, обрабатывающие тела, а также окружающую среду. Теплота деформирования генерируется в очаге

деформирования, теплота трения – непосредственно на поверхности контакта. Источник теплоты – местный, характеризуемый эффективной тепловой мощностью, т.е. количеством теплоты, образующей в единицу времени, и распределением теплоты по объему. Теплота образуется в основном вследствие пластического деформирования, поэтому источник теплоты соответствует форме очага деформирования (рис. 4.11), а сам процесс характеризуется мгновенным локальным нагревом и быстрым отводом теплоты внутрь обрабатываемой детали [9,8,7,34].

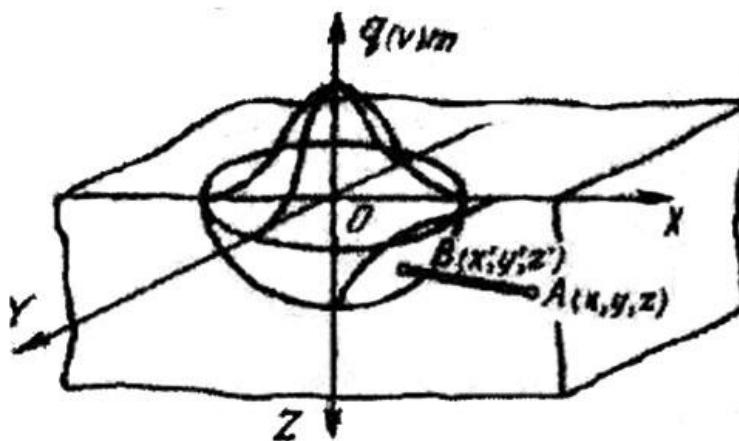


Рис. 4.11. Схема нормально-сферического источника теплоты.

Так как на размеры очага деформирования влияют многие параметры обработки, то время нагрева зависит не только от скорости, но и от давления и размеров обрабатываемых тел.

При интенсивных режимах обработки локальные участки поверхностных слоев нагреваются до различной температуры: при обкатывании – до 300-400 °С, при выглаживании – до 600-700 °С, при ударных методах – до 800-1000 °С. При этом, использование СОТС позволяет снизить температуру в зоне деформирования в несколько раз [16].

Тепловой эффект присущий ППД может вызывать термопластическое деформирование и другие явления, снижающие эффект упрочнения. Термопластическое деформирование приводит к резкому спаду остаточных сжимающих напряжений на поверхности, а в некоторых случаях – к превращению их в растягивающие. Могут образовываться также вторичные структуры, снижающие эксплуатационные свойства поверхности. Стыки структур являются концентраторами напряжений, что приводит к зарождению усталостных трещин. Необходимо устанавливать такие силовые параметры обработки конкретных материалов, которые не вызывают повышения температуры поверхности более допустимой.

Как при квазистатическом, так и при ударном воздействии обрабатываемых тел энергонесущей среды на обрабатываемой поверхности

формируется совокупность пластических отпечатков образующих на поверхности характерный для обработки методами ППД микрорельеф. Как показано на рис. 4.12 пластическое деформирование поверхности под единичным отпечатком происходит равномерно при этом, копируя с некоторыми искажениями форму поверхности обрабатываемых тел [9].

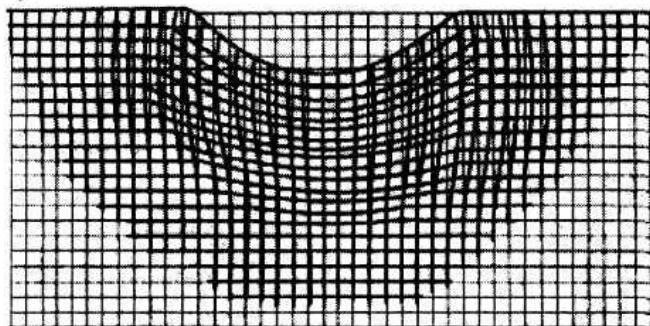


Рис. 4.12 Зона распространения пластического деформирования визуализированная по искажению прямоугольной сетки.

Глубина пластически деформированного поверхностного слоя  $h$  пропорциональна диаметру пластического отпечатка  $d$ . Для различных условий обработки  $h=1 \dots 2d$ .

Зависимость между диаметром пластического отпечатка  $d$ , формируемого на поверхности, и силовым воздействием обрабатывающего тела (например сферического индентора)  $P$  при его внедрении в упругой и пластической областях описывается уравнениями Герца и Мейера:

$$P = \frac{1}{3D \left( \frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu_1^2}{E_1} \right)} d^3; \quad (4.2)$$

$$P = ad^n,$$

где  $D$  - диаметр сферического индентора;  $E, E_1$  - модули упругости материала сферического индентора и обрабатываемого материала;  $\mu, \mu_1$  - коэффициенты Пуассона материала сферического индентора и обрабатываемого материала;  $a, n$  - константы пластичности.

Однако эти формулы не учитывают трение в зоне контакта и справедливы для условий деформирования, когда контактирующие тела изотропны, подчиняются закону Гука, площадь контакта мала и нагрузки приложены перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. Вместе с тем процессы ППД протекают в более сложных условиях, поэтому указанные формулы в данном виде имеют ограниченное применение и показывают основные силовые

зависимости при ППД.

Многократное приложение одной и той же статической силовой нагрузки при вдавливании обрабатываемого тела в одно и то же место не приводит к заметному увеличению размеров пластического отпечатка. В работе [17] показано, что в отличие от статического, при ударном воздействии обрабатываемого тела с ростом числа соударений до 15-20 размер пластического отпечатка для различных условий обработки увеличивается в 1,25-1,55 раза (рис. 4.13). Установлено, что увеличение будет меньшим, если ППД подвергаются более твердые стали, при этом, как видно из полученного в работе [30] соотношения, диаметр обрабатываемого тела не оказывает существенного влияния на рост пластического отпечатка:  $d_{\max}/d = 1,55 - HB/1000$ .

Глубина пластически деформированной зоны, полученной при многократном ударном воздействии, практически равна глубине пластически деформированной зоны, полученной при квазистатическом однократном воздействии индентора, при условии равенства диаметров пластических отпечатков. Поэтому зависимости силовых параметров нагрузки от глубины пластически деформированного слоя для условий квазистатического силового нагружения могут быть применены для ударного силового нагружения.

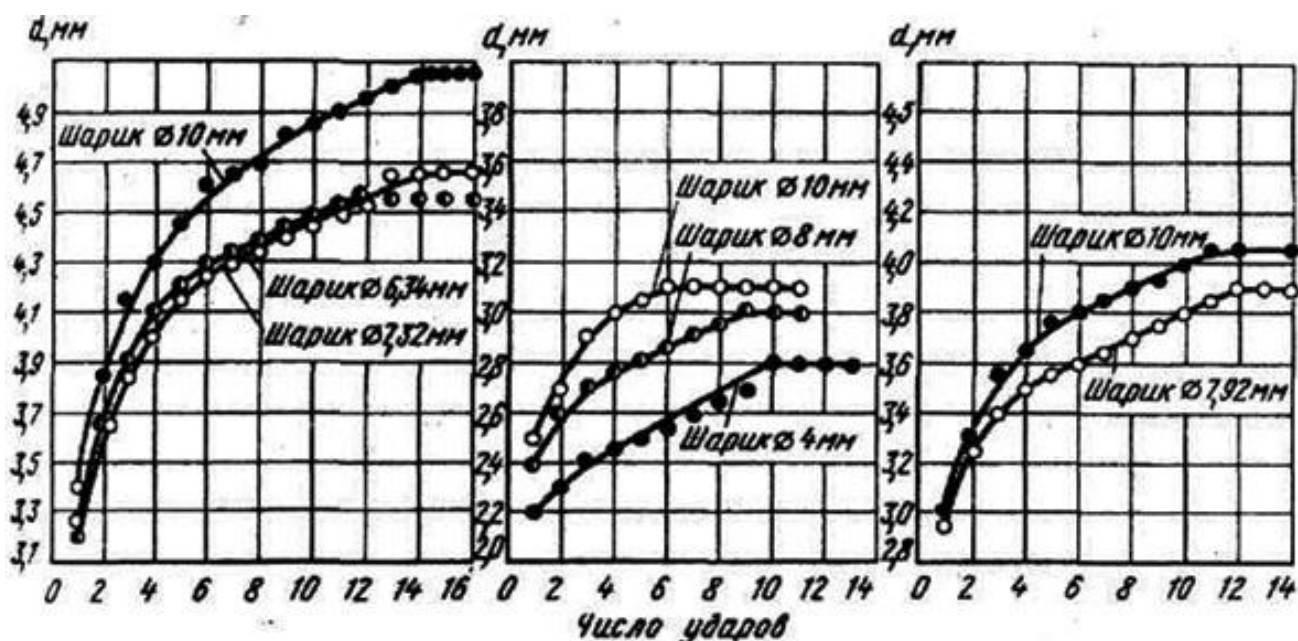


Рис. 4.13. Изменение диаметра отпечатка при увеличении числа ударов: а – Ст3, HB112; б – 12ХН4ВА, HB340; в – 35ХМ, HB207.

Характер ударного силового воздействия определяется энергией удара, развиваемой обрабатываемыми телами и скоростью деформирования. Обрабатываемое тело, помимо полезной работы деформирования, затрачивает энергию на упругий отскок и на преодоление сил трения. Поэтому

рекомендуется потенциальную энергию обрабатывающего тела, например, при обработке конструкционных сталей принимать на 15-20% больше полезной работы деформирования. Величина энергии упругого отскока обрабатывающего тела зависит от массы, жесткости обрабатываемой детали и характеристик её материала, она может составлять 25-30% и более.

На рис. 4.14 наглядно показано, что при ударном силовом нагружении обрабатываемой поверхности по сравнению с квазистатическим нагружением, в зависимости от твердости обрабатываемого материала требуется в 1,7-2,8 раза больше энергии. Одна из причин этого заключается в том, что чем больше скорость нагружения, тем меньше время протекания пластического деформирования, а следовательно, выше напряжение, при котором происходит переход от упругого деформирования к пластическому. При увеличении скорости удара до 7-8 м/с динамический предел прочности стали интенсивно возрастает, при дальнейшем увеличении скорости предел прочности изменяется незначительно.

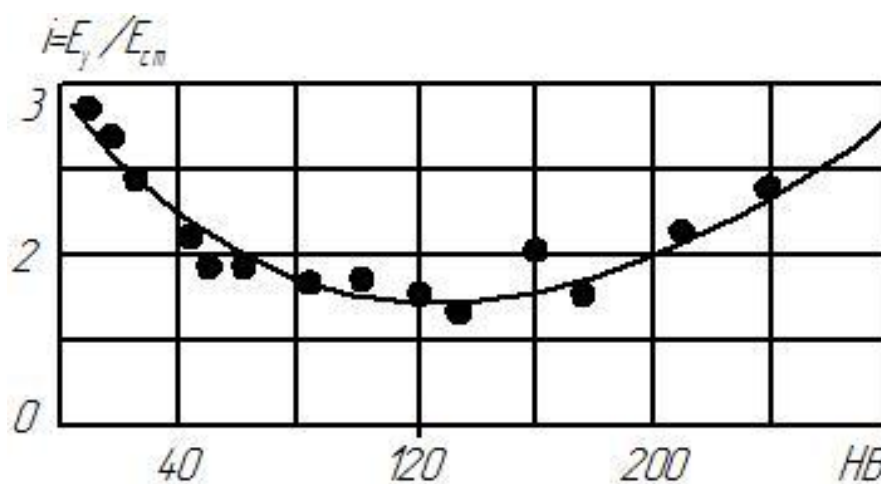


Рис. 4.14. Увеличение энергии вдавливания  $i = E_y / E_{ст}$  при ударном нагружении по сравнению со статическим нагружением для материалов различной твердости.

Увеличение скорости нагружения до 100 м/с приводит к повышению предела текучести, например, для железа армко – в 3,4 раза, для стали 45 – в 3 раза, для Ст3 – в 2,8 раза. Предел прочности для углеродистых термобработанных сталей возрастает на 43 %, для армко-железа – 55 %, т.е. с увеличением твердости материала интенсивность изменения этих характеристик уменьшается. Меньше всего указанные характеристики изменяются для высокопрочных сталей.

При завышенных силовых параметрах обработки ППД может происходить разрушение поверхностного слоя сопровождающееся появлением опасных

микротрещин, образованием частичек отслаивающегося металла, при этом поверхностные зерна сплющиваются так, что становятся почти неразличимыми, увеличивается шероховатость поверхности. Напряженное состояние упрочненного слоя можно частично или полностью снять путем отжига. Переупрочнение поверхностного слоя в процессе ППД – необратимый процесс, при котором нагрев не восстанавливает исходную структуру металла и его механические свойства.

Необходимо также обратить внимание на два экспериментально установленных факта. Первый заключается в том, что несмотря на многообразие методов ППД, разработанных для реализации этого способа упрочнения, явления, происходящие в поверхностном слое, при обработке методами ППД, имеющими одинаковый механизм силового нагружения, имеют одинаковую физическую сущность. Второй заключается в том, что различные методы ППД, в основе которых заложен единый механизм силового нагружения, оказывают влияние на физико-механические и эксплуатационные свойства деталей не столько в силу их конструктивных и кинематических особенностей, а в большей степени в силу энергетических возможностей, которые данный метод может обеспечить.

Все многообразие методов обработки пластическим деформированием можно классифицировать по ряду существенных признаков (рис. 4.15). По виду затрачиваемой энергии они относятся к методам механической обработки. По распространению очага пластической деформации различают процессы пластической деформации объемные и поверхностные. Процесс пластической деформации называется объемным, если пластическая деформация распространяется по всему объему заготовки. Если пластическая деформация локализуется и не распространяется по всему объему заготовки, то такие процессы называют процессами поверхностного пластического деформирования (ППД). В соответствии с ГОСТ 18296-72 под ППД следует понимать обработку давлением, при которой деформируется только поверхностный слой металла. Процессы ППД получают все более широкое распространение.

Качество поверхности и точность обработки ППД во многом зависят от условий деформирования металла и схемы его напряженного состояния в месте контакта инструмента и детали. Однако, несмотря на многообразие и различие существующих способов обработки ППД, исходя из условий работы инструмента, все они могут быть разделены на четыре вида (рис. 4.15): статическое ППД, ППД в условиях трения скольжения, ППД в условиях трения качения, ударное ППД.

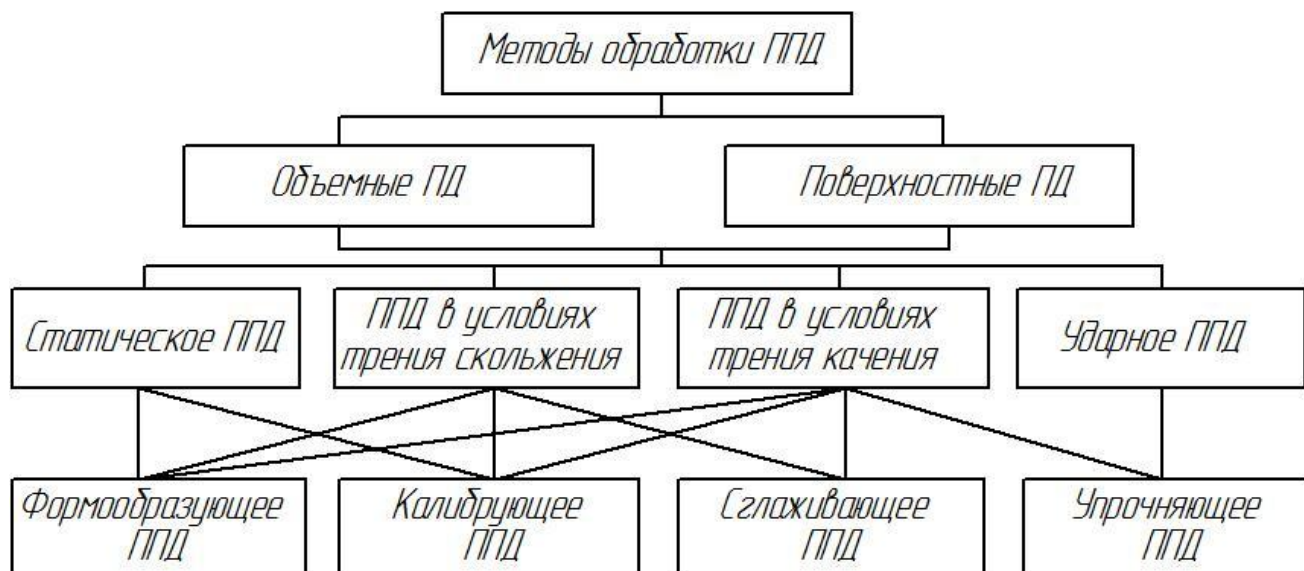


Рис. 4.15. Классификация методов пластического деформирования

Рассмотрим подробнее эти виды.

1. Статическое ППД – поверхностно пластическое деформирование при статическом взаимодействии деформируемого материала с инструментом, рабочими телами или средой. Деформирование поверхности заготовки в этом случае в основном осуществляется вследствие действия нормальных к поверхности сил (статическое деформирование поверхности торцом гладкого или фигурного пуансона), рис. 4.16.

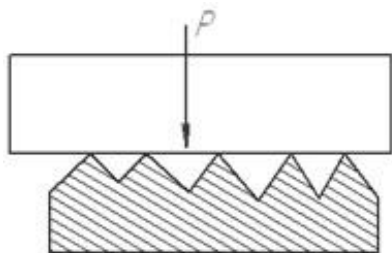


Рис. 4.16. Статическое ППД

2. ППД в условиях трения скольжения – поверхностное пластическое деформирование при скольжении инструмента по локально контактирующей с ним поверхности обрабатываемого материала (рис. 4.17). Для этого вида характерно наличие в зоне контакта инструмента и детали не только нормальных сил, но и сил трения, появляющихся вследствие перемещения инструмента по образующей обрабатываемой поверхности. Силы трения значительно изменяют схему напряженного состояния металла в зоне его контакта с инструментом и оказывают существенное влияние на процесс деформирования поверхностного слоя. На использовании трения скольжения основаны процессы выглаживания поверхностей, поверхностное дорнование и поверхностное редуцирование.

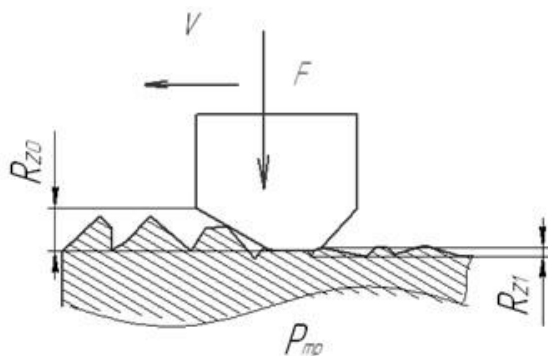


Рис. 4.17. ППД в условиях трения скольжения

3. ППД в условиях трения качения – поверхностно пластическое деформирование при качении инструмента по поверхности деформируемого материала (рис. 4.18). К этому виду ППД относятся многочисленные методы обработки деталей роликовыми и шариковыми инструментами. К этой же группе можно отнести процессы накатывания различных профилей, резьб, зубчатых колес, так как они осуществляются по кинематике качения.

4. Ударное ППД – поверхностно пластическое деформирование при ударном воздействии деформируемого материала с инструментом, рабочими телами или средой (рис. 4.19). Деформирование при больших скоростях относительного соударения и перемещение и детали приводит к значительному поверхностному наклепу – изменению структуры металла без его полной рекристаллизации. Величина и степень наклепа зависят от массы соударяющихся тел, скорости их относительного движения и других факторов, определяющих энергию удара инструмента об обрабатываемую поверхность.

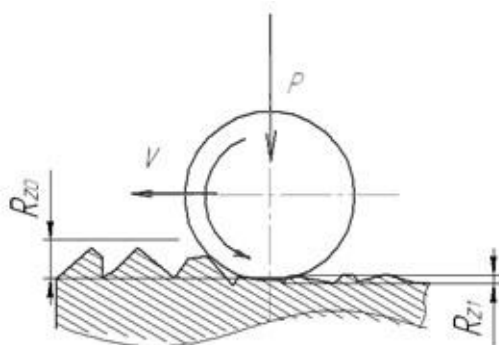


Рис. 4.18. ППД в условиях трения качения

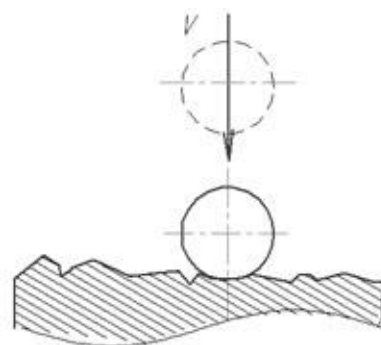


Рис. 4.19. Ударное ППД (энергия удара  $E = \frac{mV^2}{2}$ )

К способам обработки ППД с ударным воздействием рабочих тел относятся: обработка дробью, центробежная обработка, галтовка, обработка металлическими щетками, упрочняющая чеканка и др.

В зависимости от технологического назначения процессы ППД делят также на формообразующие, калибрующие и упрочняющие.

Формообразующие ППД – это поверхностное пластическое деформирование, образующее определенную макро- и (или) микрогеометрическую форму поверхности деформируемого материала. В отличие от формообразования при объемном пластическом деформировании поверхностное пластическое деформирование осуществляется за счет пластического течения поверхностных слоев материала заготовки. При формообразовании ППД, как правило, простая поверхность преобразуется в более сложную, причем образование необходимой формы при этом совмещается с отделкой поверхности и упрочнением поверхностного слоя материала (рис. 4.20).

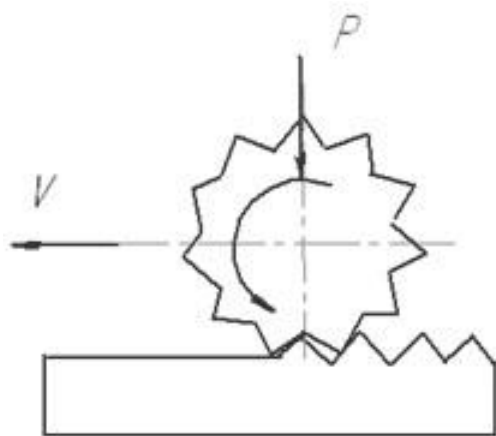


Рис. 4.20.  
Формообразующее ППД

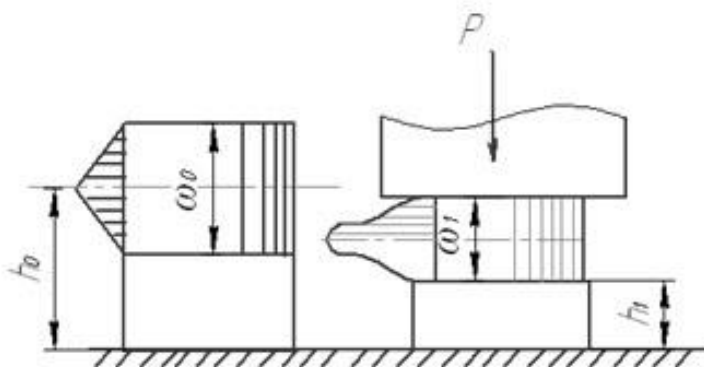


Рис. 4.21. Калибрующее ППД ( $h_0$ ,  $\omega_0$  и  $h_1$ ,  $\omega_1$  – соответственно размер и поле рассеивания размера до и после обработки)

С помощью процессов поверхностного пластического формообразования в настоящее время можно получать мелко модульные зубчатые колеса, наружные и внутренние шлицы, резьбы, конусные детали типа штифтов, ступенчатые и гладкие валы, сферические и другие детали.

Калибрующие методы ППД - это поверхностное пластическое деформирование, изменяющее размеры заготовки до допускаемых размеров. При калибрующем ППД наряду с повышением точности размеров и формы обеспечивается значительное снижение шероховатости и упрочнение поверхности детали (рис. 4.21).

Сглаживающее ППД – это поверхностное пластическое деформирование, уменьшающее шероховатость поверхности деформируемого материала.

Упрочняющее ППД – это повышение сопротивляемости материала или заготовки разрушению или остаточной деформации поверхностным наклепом.

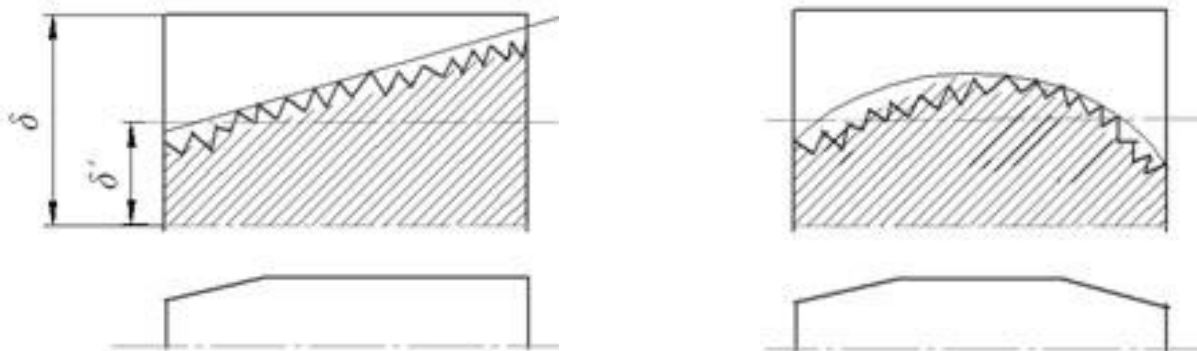
Поверхностный наклеп приводит к изменению структуры материала без его его полной рекристаллизации, причем материал находится в статически напряженном состоянии. Упрочнение наклепом приводит к повышению поверхностной твердости и микротвердости. В поверхностном наклепанном слое создаются сжимающие напряжения. Сжимающие остаточные напряжения уменьшаются по мере удаления от поверхности, переходя на некоторой глубине в уравнивающие их растягивающие напряжения.

Рассмотренное разделение способов ППД по технологическому назначению весьма условно. Зачастую один и тот же способ ППД может реализовать различные технологические задачи в зависимости от применяемых режимов обработки. Рассмотрим некоторые из указанных способов.

**Калибрующая обработка ППД.** Методы калибрования пластическим деформированием весьма разнообразны и могут быть применены для обработки как наружных и внутренних цилиндрических, так и для различных профильных поверхностей. Эти процессы отличаются высокими показателями по точности и качеству поверхности, что в сочетании с высокой производительностью делает их применение особо эффективным. В ряде случаев калибрование пластическим деформированием является единственным средством достижения высокой точности формы, размеров и качества поверхности сложных ответственных деталей. Повышение точности формы и размеров деталей при калибровании их давлением возможно за счет:

- неравномерного изменения формы заготовки по всему ее сечению (при обработке деталей – тел вращения);
- неравномерной пластической деформации поверхностного слоя металла ниже уровня исходных микронеровностей после предварительной обработки резанием или давлением;
- неравномерного сглаживания неровностей исходной поверхности.

Наиболее широко распространен способ калибрования, основанный на неравномерном заполнении впадин микрорельефа исходной поверхности металлов выступов, как показано на рис. 4.22.



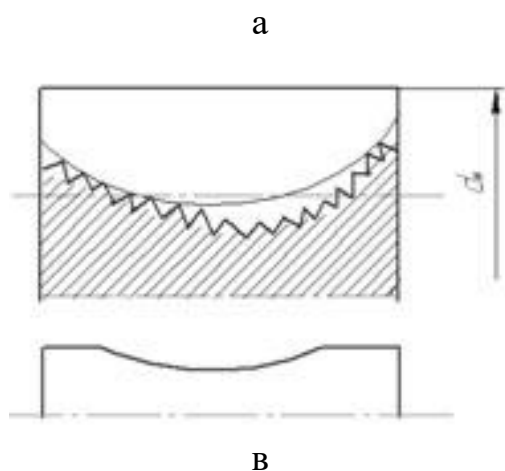


Рис. 4.22. Схема исправления погрешностей формы заготовки при калибровании давлением: а - конусообразность; б - бочкообразность; в - корсетообразность

Погрешности формы заготовок в радиальном направлении (эллипсность) и в продольном (конусообразность, бочкообразность, корсетообразность) сечениях приводят к вынужденному изменению величины удельного давления в зоне контакта и соответственно к неравномерной пластической деформации, в результате чего достигается исправление формы заготовки. В большинстве случаев исправление погрешности формы заготовки возможно в пределах остаточной деформации, т.е. в пределах изменения размера  $\Delta d$ .

Таким образом, возможности исправления геометрической формы заготовки (как в радиальном, так и осевом сечениях) определяются условием

$$\Delta d \geq (\delta - \delta'), \quad (4.3)$$

где  $\delta$  – допуск заготовки под обработку давлением;  $\delta'$  – допуск на обработку детали.

Величина остаточной деформации при исходной обточенной или расточенной поверхности может быть приближенно рассчитана по формуле

$$\Delta d = k(R_{z_{исх}} - R_z), \quad (4.4)$$

где  $R_{z_{исх}}$  – высота неровностей исходной поверхности;  $R_z$  – высота неровностей после калибрования давлением;  $k$  – коэффициент, зависящий от свойств от свойств обрабатываемого материала ( $k = 1, 3 \dots 1, 5$ ).

Калибрование возможно в условиях жесткой системы СПИД и применения инструмента жесткой конструкции.

**Калибрующая чеканка.** Калибрующая чеканка используется для повышения точности размеров и форм детали. Чаще всего калибрующая чеканка применяется для повышения точности поковок (по массе и размерам), а также для получения более высокого качества поверхности. Эта операция заключается в незначительном обжатии заготовок. Обжатие заготовок между плоскими плитами называется плоской калибровкой. Она дает возможность значительно повысить точность размеров заготовок и в направлении приложения усилия.

Если калибровке подвергают неплоские поверхности заготовок, то при этом образуется небольшой облой по разьему штампов и имеет место объемная калибровка. Последняя позволяет повысить точность всех размеров заготовок, а также точность массы заготовок. Для некоторых заготовок может быть применена частично плоскостная и частично объемная калибровка. Операция калибровки совершается чаще без нагрева заготовок. Поэтому калибровке подвергают заготовки, прошедшие уже термическую обработку.

Калибровка, совершаемая при температуре 700...800°C, называется горячей калибровкой; она не обеспечивает шероховатость поверхности, достигаемую при холодной калибровке, но происходит при более низких удельных усилиях. Горячую калибровку применяют до термической обработки заготовки.

По точности получаемых размеров различают грубую калибровку (обеспечивает допуски  $\pm 0,1 \dots \pm 0,25$ ) и калибровку повышенной точности (с допусками  $\pm 0,05 \dots \pm 0,1$ ). При необходимости после двукратной калибровки можно получить еще более высокую точность размеров (до  $\pm 0,025$ ). Шероховатость поверхности при калибровке без нагрева поковок  $Ra = 1,25 \dots 0,63$  мкм, т.е. такая же, как при шлифовании. Процесс калибровки осуществляют на специальных чеканочных (коленно-рычажных) прессах, обладающих малым ходом и большой жесткостью.

***Дорнование цилиндрических отверстий.*** Изготовление точных отверстий всегда является более сложной задачей по сравнению с обработкой наружных поверхностей. При обработке резанием это объясняется ограниченным рабочим пространством и в связи с этим недостаточной жесткостью режущего инструмента, затрудненным стружкоотведением, особенно при обработке глубоких отверстий. При шлифовании из-за малых размеров круга трудно достичь оптимальных скоростей резания, на обработанной поверхности часто остаются абразивные крошки, снижающие эксплуатационные свойства деталей.

Применение процесса дорнования отверстий устраняет эти и многие другие недостатки. Поверхностное дорнование – это процесс ППД при поступательном скольжении дорна по внутренней поверхности деформируемой детали. Процесс калибрования отверстий дорнованием заключается в том, что инструмент (дорн) определенной формы проталкивается (протягивается) через обрабатываемое отверстие, имеющее несколько меньшие размеры по сравнению с размером калибрующего дорна (рис. 4.23). При этом вследствие пластических деформаций диаметр отверстия увеличивается, поверхностный слой металла в отверстии упрочняется, а шероховатости сглаживаются.

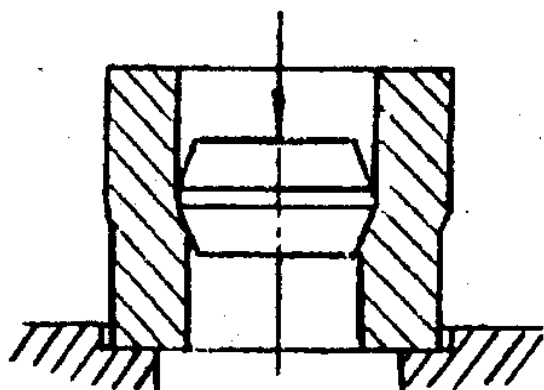


Рис. 4.23. Схема дорнования по схеме сжатия

Рабочая поверхность дорна может быть различной: шаровой, криволинейной, конусной. У каждого дорна можно выделить заборную, калибрующую и обратную части. Наиболее распространенной формой дорна является коническая. Разность между диаметром дорна  $d$  и заготовки  $d_0$  называется натягом дорнования

$$i = d - d_0. \quad (4.5)$$

Все технологические и качественные характеристики процесса зависят от величины натяга, определяющего степень деформации. В зависимости от величины натяга, деформация детали в поперечном сечении может быть чисто упругой. При дальнейшем росте натяга возникает пластическая зона деформации, охватывающая некоторую область металла детали у отверстия, при дальнейшем увеличении натяга дорнования все поперечное сечение заготовки в зоне деформации находится в пластическом состоянии. Деталь деформируется также и в осевом направлении.

Величина деформации наружной поверхности детали

$$I = D - D_0 \quad (4.6)$$

где  $D$  и  $D_0$  – соответственно наружный диаметр детали до и после деформации.

Полная деформация детали, определяемая величиной натяга при дорновании, может быть представлена в виде суммы упругой и пластической деформации:

$$\delta_d = (\delta_d)_{упр} + (\delta_d)_{ост}. \quad (4.7)$$

Однако при рассмотренных (рис. 4.23) схемах дорнования отверстий, особенно в тонкостенных втулках, величина максимальных удельных контактных давлений недостаточна для интенсивного сглаживания неровностей. Это можно устранить, если дорнование осуществлять при ограничении деформации детали по наружному диаметру, помещая деталь в обойму, или при совмещении процесса дорнования с редуцированием (рис. 4.24). В отличие от свободного дорнования при других схемах деформирование идет за счет принудительного утонения стенки детали.

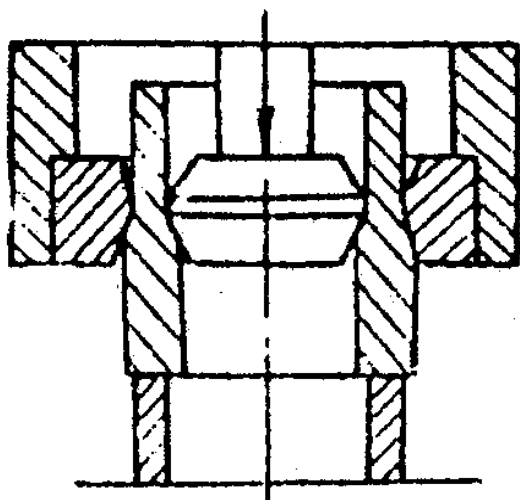


Рис. 4.24. Схема дорнования и редуцирования

Преимущества процессов дорнования в жесткой обойме и совместного дорнования и редуцирования заключается в следующем (рис. 4.24):

- за счет больших контактных давлений шероховатости поверхности интенсивно сглаживаются;
- одновременно с внутренней калибруется и сглаживается наружная поверхность детали;
- процесс приближается к схеме всестороннего сжатия, что позволяет производить обработку с большей степенью деформации без разрушения.

При одной и той же величине натяга тяговое усилие больше при дорновании в обойме и совместном дорновании с редуцированием. Изменяются соотношения между упругими и пластическими деформациями и характер деформации детали в осевом направлении. В жестких обоймах требуемую шероховатость поверхности можно получить при меньших значениях величины натяга по сравнению со свободным дорнованием.

В производственных условиях процесс дорнования может осуществляться на том же оборудовании, какое применяется и при обработке деталей режущими протяжками, т.е. на разнообразных протяжных станках или прессах. Дорны изготавливают из разнообразных марок сталей, наилучшие результаты по стойкости дают дорны с твердосплавными кольцами (ВК8 и Т5К10). При дорновании деталей с оптимальным натягом, возможно, получать отверстия с точностью по 8...9-му качеству и шероховатости в пределах  $Ra=1,25...0,04$  мкм.

**Дорнование (калибрование) фасонных отверстий.** Особо ответственные детали со шлицевыми отверстиями изготавливают в большинстве случаев из сталей, подвергающихся цементации и последующей закалке до твердости HRC 56...62. Однако в процессе цементации и последующей закалки происходит деформация (коробление) деталей, которая приводит к искажению формы и размеров шлицевого отверстия на величину, значительно превышающую

величину допуска 9-го, а иногда 11-го качества. Обработку (восстановление формы) сопрягаемых поверхностей шлицевого отверстия, имеющих твердость HRC 56...62, при центрировании по наружному диаметру можно производить с помощью шлицевых дорнов.

При калибрующем дорновании фасонным дорном сравнительно тонкий цементированный и закаленный слой металла продавливается дорном и формируется вследствие смещения более вязкого металла, расположенного в глубине детали. Дорнование может применяться не только для калибрования предварительно подготовленных резанием фасонных (шлицевых, многоугольных и др.) отверстий, но и для полного выдавливания дорном разнообразных профилей в предварительно подготовленном цилиндрическом отверстии. При помощи дорнов возможно образование и калибрование сложного профиля не только в цилиндрических, но и в конусных криволинейных отверстиях.

Фасонные дорны изготавливают из тех же инструментальных материалов, что и дорны для цилиндрических отверстий. Наилучшие результаты по стойкости дает инструмент, оснащенный твердосплавными деформирующими элементами. Деформирующие элементы из твердого сплава прикрепляются пайкой или используется механическое крепление на оправке из закаленной стали.

***Калибрующее обкатывание поверхностей.*** Калиброванию обкатыванием подвергаются заготовки, представляющие собой тела вращения и изготовленные из различных металлов. Обрабатываются могут как цилиндрические, так и конические поверхности. Предварительной обработкой в подавляющем большинстве случаев является получистовое и чистовое точение, обеспечивающее шероховатость поверхности  $R_z \leq 20$  мкм, и лишь в отдельных случаях – получистовое шлифование с шероховатостью, соответствующей  $R_a = 1,25$  мкм. Практика показала, что даже предварительная обработка шлифованием крупнозернистым кругом с последующим обкатыванием ППД значительно экономичнее, чем тонкое шлифование мелкозернистыми кругами и полирование, не говоря уже о более высоком качестве поверхности, достигаемом в первом случае.

Обкатывание может производиться между цилиндрическими и коническими роликами на специальных станках, резьбонакатных или других станках, кинематика которых позволяет реализовать этот метод обработки. Наиболее широко применяемые схемы обкатывания между роликами показаны на рис. 4.25.

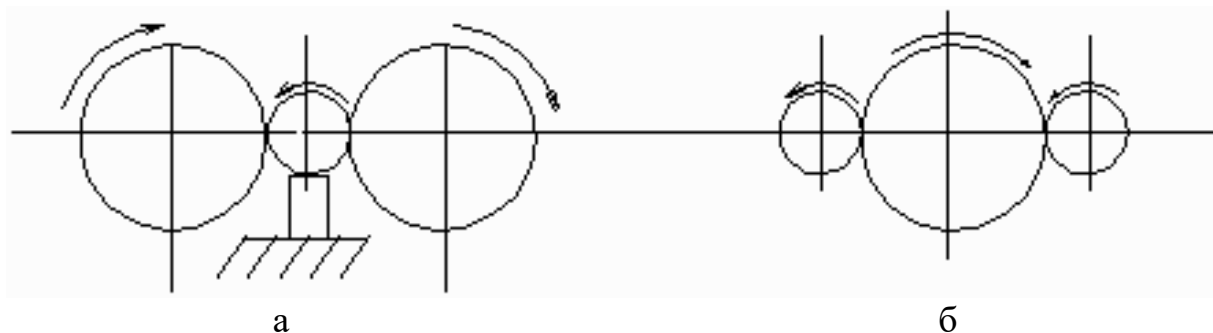


Рис. 4.25. Схемы обкатывания между роликами: а – с принудительным вращением роликов и самозатягиванием заготовки; б – с принудительным вращением заготовки.

Сущность процесса обкатывания состоит в том, что под воздействием давления закаленных роликов микронеровности обрабатываемой поверхности пластически деформируются, заполняя впадины микропрофиля; при этом происходит выравнивание образующей поверхности, некоторое исправление формы и уменьшение размеров заготовки. Усилие, необходимое для сглаживания шероховатости исходной поверхности, зависит от свойств обрабатываемого металла, диаметра и длины роликов, от шероховатости поверхности после предварительной обработки.

При обкатывании между роликами одновременно с улучшением шероховатости поверхности достигается и поверхностное упрочнение обкатываемого металла. Глубина упрочненного слоя зависит от свойств обрабатываемого металла и от давления на ролики, она может достигать нескольких миллиметров. Эффективно применение метода обкатывания для калибрования, рихтования и отделки цилиндрических деталей типа валов и осей диаметром до 10 мм. Припуск на обкатывание колеблется в пределах 0,03...0,05 мм. Процесс обкатывания обычно длится не более 3...5 с.

В настоящее время все большее распространение получает способ калибрования наружных цилиндрических поверхностей деталей типа валов цилиндрическими и коническими роликами, установленными в обкатных головках, закрепленных в сверлильных, токарных, расточных и других станках, а также на специальных станках, чаще всего автоматического действия. Профильные поверхности деталей – тел вращения – могут калиброваться обкатыванием плашками, роликами и шарами.

Калибрование и отделка наружных резьб и зубьев зубчатых колес производится обычно обкатыванием по тем же схемам, что и накатывание резьбы и зубьев зубчатых колес. Как и при обкатке цилиндрических поверхностей, повышение точности формы и размеров деталей возможно лишь при жестком (неупругом) контакте деформируемого элемента с обрабатываемой

поверхностью за счет неравномерной деформации исходных неровностей и ограничивается величиной остаточной деформации.

**Раскатывание отверстий жесткими раскатниками.** Значительные силы трения, возникающие при прошивании и протягивании отверстий дорнами, а также необходимость в создании больших давлений на обрабатываемую поверхность ограничивает область применения этого метода обработки отверстий относительно малого диаметра (до 40...50 мм) в деталях, обладающих достаточной жесткостью. Более совершенными и универсальными в этом отношении являются методы обработки, основанные не на трении скольжения, а на качении деформирующего элемента относительно обрабатываемой поверхности, в частности способ раскатывания роликами и шариками. Раскатыванием обрабатываются отверстия диаметром от 6 до 500 мм и длиной до 3...5 м в деталях из различных сталей, чугуна и цветных металлов.

В зависимости от конструкции и размеров обрабатываемых деталей, назначения и требований к точности и шероховатости отверстий применяется раскатывание по различным схемам с использованием инструментов – раскатников различной конструкции.

Для калибрования и отделки сквозных и глухих точных отверстий малого диаметра (от 6 до 30 мм) применяют многороликовые жесткие нерегулируемые раскатники (рис. 4.26,а). Конструкцией жестких регулируемых раскатников (рис. 4.26,б) предусматривается возможность изменения их рабочего размера в определенных пределах, что делает инструмент более универсальным и экономичным. Раскатывание производится на сверлильных, токарных и расточных станках после растачивания с точностью по 7-му качеству и шероховатостью  $Ra \leq 2,5$  мкм.

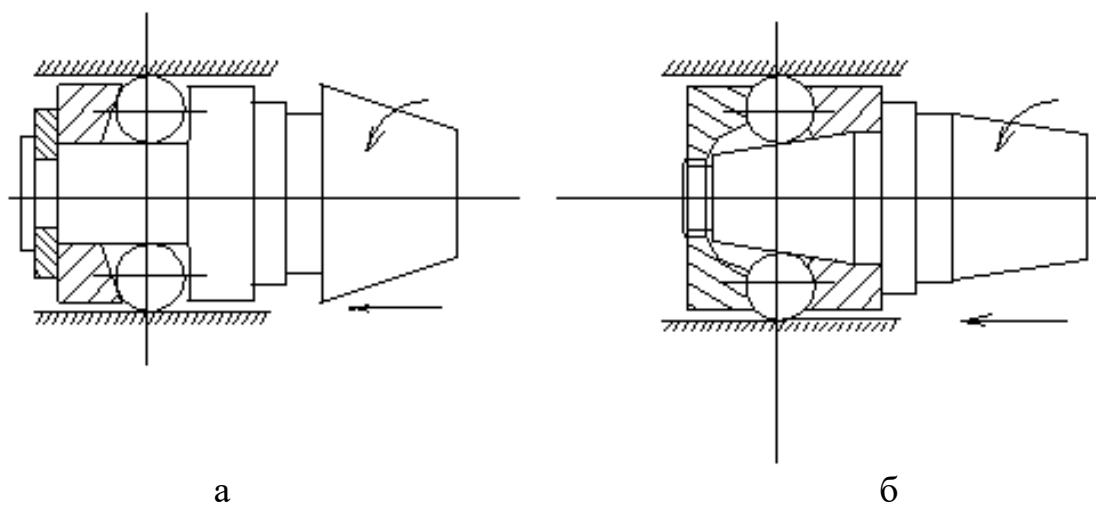


Рис. 4.26. Жесткие нерегулируемые (а) и регулируемые (б) шариковые раскатники

Величина остаточной деформации, как и при дорновании, зависит от величины натяга, а точность обработки – в первую очередь от точности предварительной обработки под раскатывание. Число проходов определяется требованиями к шероховатости обрабатываемой поверхности: первый проход улучшает исходную шероховатость ( $Ra=2,5\ldots1,25$  мкм) до  $Ra=0,63\ldots0,32$  мкм, второй и третий – до  $Ra=0,16\ldots0,08$  мкм. Микротвердость поверхностного слоя увеличивается на 40...60 %.

Для длинных отверстий применяют многороликовые раскатники. К деталям, подлежащим обработке многороликовыми жесткими раскатниками, относятся стальные гидро- и пневмоцилиндры, цилиндры и трубы различных сельскохозяйственных машин, цилиндры амортизаторов автомобилей, а также втулки, толстостенные корпусные детали, коромысла и т.п.

**Отделочная (сглаживающая) обработка ППД.** Сглаживающее ППД используется лишь для отделки – улучшения шероховатости поверхности или упрочнения поверхностного слоя металла. В этом случае применяется инструмент упругого действия, обеспечивающий упругий контакт между деформирующим элементом и обрабатываемой поверхностью. Процесс пластического деформирования протекает наиболее равномерно и плавно, так как погрешности формы и колебания размеров заготовок, неоднородность твердости обрабатываемого металла, волнистость и неоднородность шероховатости исходной поверхности, которые приводят к неоднородности степени деформации при работе жесткими инструментами, в значительной мере компенсируются упругими элементами инструмента.

В результате в поверхностном слое металла создается более равномерное упрочнение, как по степени, так и по глубине; нагрузки на оборудование и инструмент уменьшаются, повышается стойкость деформирующих элементов. При упругом контакте форма поверхности и ее размеры изменяются незначительно: в пределах допуска на предшествующую обработку.

**Выглаживание поверхностей.** Выглаживание – это поверхностное пластическое деформирование при скольжении инструмента по локально контактирующей с ним поверхности деформируемого материала. Выглаживание производится для уменьшения шероховатости поверхности, упрочнения поверхностного слоя и, в ряде случаев, для повышения точности размеров и формы деталей (калибрования). Наиболее часто выглаживание применяется как отделочно-упрочняющая операция для ответственных поверхностей деталей.

В процессе обработки инструмент для выглаживания скользит по поверхности, прижатый к ней с определенной силой. В результате пластического деформирования обрабатываемой поверхности происходит сглаживание исходных неровностей и образование нового микрорельефа со значительно

меньшей высотой неровностей. Размер детали уменьшается на величину остаточной деформации. На размер и форму образующихся неровностей влияют также неоднородность шероховатости и твердости обрабатываемой поверхности, колебания сил выглаживания, вызванные биением детали, и ряд других факторов.

Продольная подача инструмента зависит от вида упрочняемого материала. Для закаленных сталей она составляет 0,02...0,04 мм/об., для цветных металлов и незакаленных сталей — 0,03...0,05 мм/об. Основное условие при выборе подачи — отсутствие неупрочненных участков на поверхности деталей.

В качестве материала рабочей части инструмента для выглаживания применяют алмазные, твердосплавные и минералокерамические инденторы.

Особенностью алмазного выглаживания в отличие от других методов ППД является применение в качестве деформирующего элемента алмаза, который обладает высокой твердостью, низким коэффициентом трения по металлу, низкой шероховатостью, с которой может быть отполирован алмаз, высокой теплопроводностью.

Высокая твердость алмаза позволяет обрабатывать почти все металлы, поддающиеся пластической деформации, как мягкие, так и закаленные до твердости HRC60..65. Малая величина радиуса инструмента – выглаживателя (0,75...4 мм) обуславливает малую величину силы выглаживания (50...250 Н), что позволяет обрабатывать тонкостенные и маложесткие детали и снижает требования к жесткости технологического оборудования. Алмазное выглаживание осуществляют, как правило, за один проход, так как увеличение числа проходов не изменяет существенно шероховатость поверхности упрочняемой детали.

Геометрическая форма рабочей части инструмента может быть сферической, цилиндрической или конической – зависит от обрабатываемой поверхности, обрабатываемого материала рабочей части выглаживателя. Выглаживатели сферической формы являются более универсальными.

Существуют два способа выглаживания: с жестким и упругим закреплением инструмента (рис. 4.27).

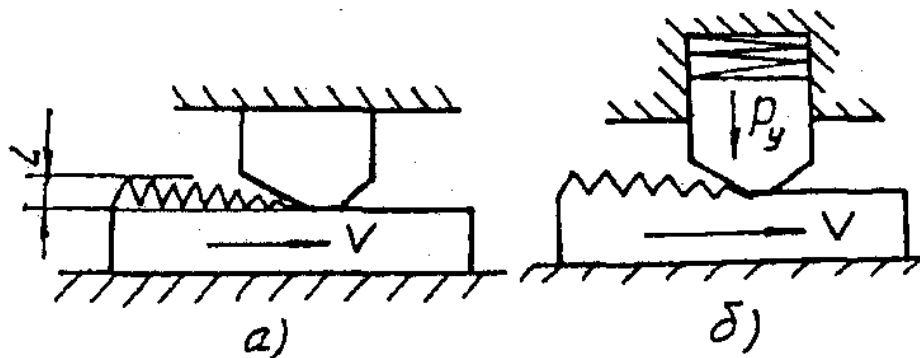
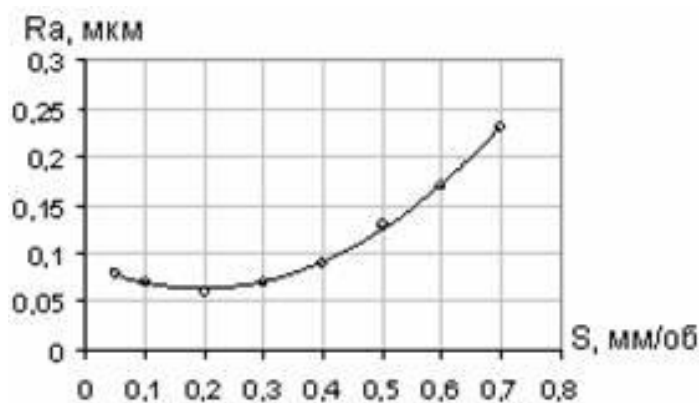


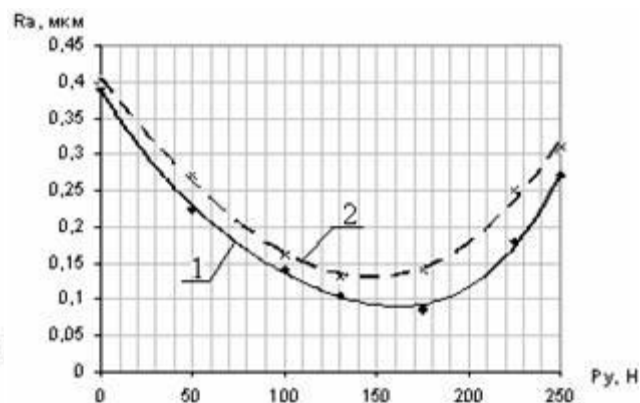
Рис. 4.27. Выглаживание поверхностей с жестким (а) и упругим (б) закреплением инструмента

Достоинством способа с жестким закреплением выглаживателя является возможность повышения точности размеров и формы обрабатываемой детали путем перераспределения объемов пластически деформируемого металла и возможность обработки прерывистых поверхностей. Однако из-за биения обрабатываемой заготовки величина внедрения выглаживателя могут колебаться в значительных пределах. В результате чего обрабатываемая поверхность имеет неодинаковую шероховатость и неоднородна по физико-механическим свойствам. Поэтому, выглаживание с жестким закреплением выглаживателя может быть рекомендовано для обработки особо точных деталей на станках повышенной точности.

Наибольшее распространение получило выглаживание с упругим закреплением инструмента, которое производится на токарных, расточных, строгальных, агрегатных и других станках. Выглаживание с упругим закреплением инструмента – более простой и удобный способ, при котором инструмент упруго прижимается к обрабатываемой детали с помощью пружины или иным способом. При упругом закреплении выглаживателя погрешности формы копируются и не исправляются. Происходит только сглаживание поверхности (снижение шероховатости) и ее упрочнение (рис. 4.28 и 4.29).



а



б

Рис. 4.28. Зависимость высоты микронеровностей  $R_a$  от радиальной силы  $P_y$  при выглаживании ( $R=1$  мм;  $S=0,05$  мм/об): 1 – для стали P18 с покрытием TiN; 2 – для стали P6M5 с покрытием TiN.

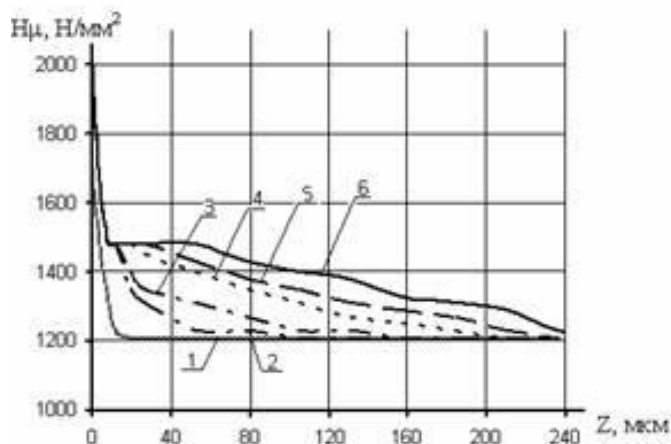
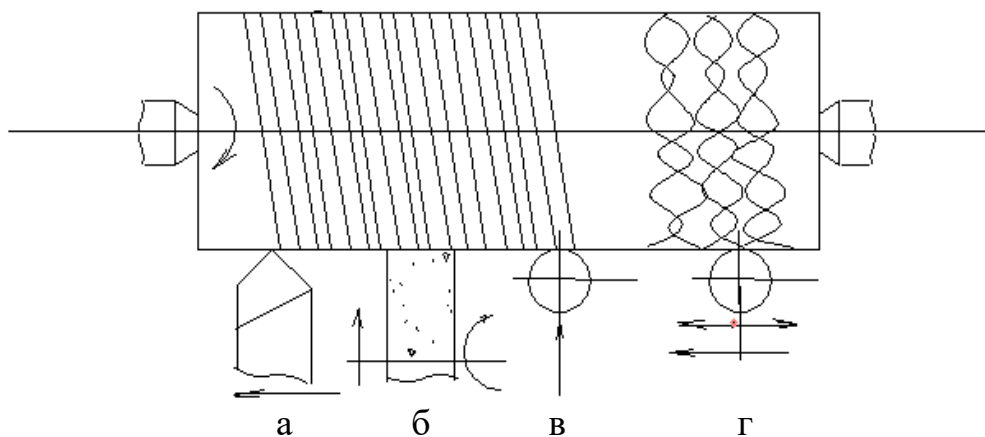
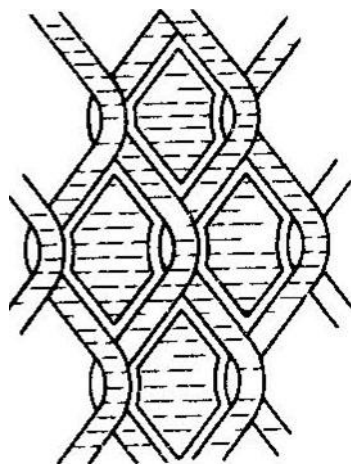


Рис. 4.29. График зависимости остаточных напряжений на поверхности от радиальной силы  $P$ : 1) для фазы TiN; 2) для фазы  $\alpha$ -Fe; 3) для фазы Ti<sub>2</sub>N [26].

**Вибрационное накатывание.** Вибрационное накатывание – накатывание при вибрации инструмента в направлении, касательном к поверхности деформируемого материала.

В отличие от идеальной, задаваемой на чертеже, реальная поверхность деталей никогда не бывает абсолютно гладкой, а всегда имеет шероховатости, образующие ее микрорельеф. Характер микрорельефа (размеры, форма, взаиморасположение микронеровностей) определяется способом и условиями обработки поверхности (рис. 4.30).





д

Рис. 4.30. Схема образования следов инструмента при различных методах обработки: а – точение; б – шлифование; в – обкатывание; г – вибрационное обкатывание; д - внешний вид виброобкатанной поверхности.

При вибрационном обкатывании траектория движения инструмента представляет собой синусоиду (без учета перемещения в направлении подачи  $S$ ), амплитуда которой равна величине вибрации шара  $2l$ , а длина волны  $\lambda$  зависит от соотношения между числом двойных ходов инструмента  $n_{\text{дв.ход}}$  и частотой вращения заготовки  $n_z$ . отношение  $\frac{n_{\text{дв.ход}}}{n_z} = j$  является основным параметром, определяющим характер взаиморасположения выдавливаемых канавок в направлении вращения заготовки (рис. 4.30,г).

К основным преимуществам способа вибрационного накатывания можно отнести возможность создания тонкорегулируемого микрорельефа поверхности и повышение производительности обработки. Наибольшее применение способ вибронакатывания получил для обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей деталей – тел вращения.

Большинство процессов обработки ППД отличается несложной кинематикой движения инструмента и характеризуется простотой и однообразием направлений следов обработки на поверхности детали.

**Упрочняющая обработка ППД.** В результате ППД изменяются не только размеры заготовки, шероховатость поверхности, но и физико-механические свойства периферийного слоя металла с образованием в нем остаточных напряжений (в основном сжимающих). Основным назначением процессов упрочняющего ППД является повышение несущей способности поверхностного слоя деталей.

**Упрочняющее накатывание.** Упрочняющее накатывание – это накатывание, при котором происходит поверхностное упрочнение. Накатывание по выпуклой или плоской поверхности материала называется поверхностным

обкатыванием. Обкатку выпуклых или плоских деталей производят роликами или шариками (одним или несколькими), имеющими разные рабочие профили (рис.4.31). Обкатка осуществляется продольным перемещением ролика или шарика по обрабатываемой поверхности с нагружением его определенной силой или только нагружением без продольного перемещения. В результате обкатки в значительной степени повышается долговечность деталей, работающих в условиях циклических нагружений. При обкатке в зависимости от ее режима может быть снижена или повышена шероховатость поверхности.

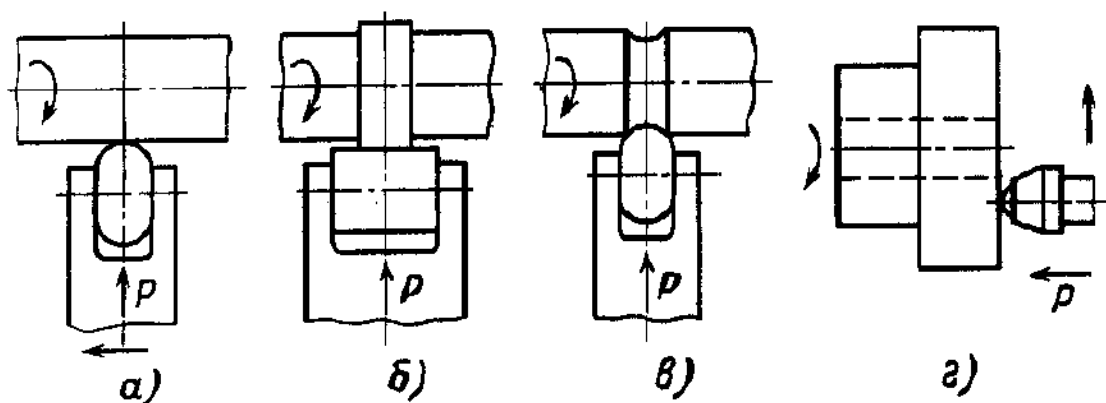


Рис. 4.31. Схемы процесса упрочняющего обкатывания

Если необходимо получить большую глубину наклепанного слоя с большими остаточными напряжениями сжатия, обкатку производят при высоких давлениях роликами со сферическим контуром. Наряду с упрочняющей широкое применение получает упрочняюще-сглаживающая обкатка, при которой снижается шероховатость обрабатываемой поверхности до  $Ra=0,040...0,160$  мкм, что в ряде случаев позволяет изменить чистовое шлифование обкаткой роликами.

Влияние режима обкатки (усилия на ролик, подачи, скорости и числа проходов) на качество обработки зависит от свойств обрабатываемых материалов и назначения обкатки (сглаживающая или упрочняющая обработка).

Наиболее широко упрочняющую обкатку роликами применяют для упрочнения крупных деталей – локомотивных и вагонных осей, торсионных валов, зубчатых колес и других деталей. Особая эффективность упрочнения крупных деталей объясняется возможностью получать в процессе обкатки большую глубину (до 35 мм) и высокую степень наклепа. Например, обкатка подступичной части осей вагонов при глубине наклепа 13...19 мм увеличивает срок их службы в 25 раз.

**Центробежно-шариковая обработка.** На практике получают все более широкое распространение методы упрочняющей обработки металлов,

основанные на динамическом действии (ударе) инструмента на обрабатываемую поверхность. К этим методам относятся чеканка, обработка вибрирующими роликами и шариками, центробежно-шариковая обработка, обработка механическими щетками, дробеструйная обработка и др.

Способ упрочнения центробежно-шариковым наклепом основан на использовании центробежной силы стальных шариков диаметром 7...12 мм, свободно вращающихся со скоростью 20...40 м/с над обрабатываемой поверхностью (рис. 4.32). Встречая на своем пути заготовку, движущуюся навстречу шарикам со скоростью 30...90 м/мин, каждый шарик с силой ударяется об обрабатываемую поверхность, производит наклеп ее и сглаживание шероховатостей. В качестве оборудования применяются токарные, шлифовальные и другие станки как общего, так и специального назначения.

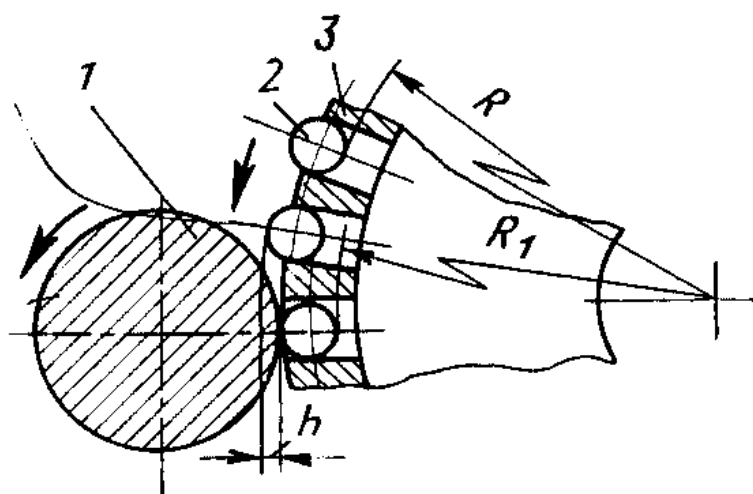


Рис. 4.32. Схема взаимодействия шариков с деталью при центробежно-шариковой обработки.

Режим процесса центробежно-шариковой обработки характеризуется окружной скоростью упрочнителя  $V$ , натягом  $i$ , количеством шариков в сепараторе  $z$  и их диаметром  $d_m$ , окружной скоростью заготовки  $V_z$ , величиной продольной подачи  $S_o$ , количеством проходов  $K$ . Необходимый натяг  $i$  обеспечивается установкой упрочнителя на определенном расстоянии от заготовки при помощи поперечного винта суппорта или стола станка. Режим центробежно-шариковой обработки в значительной мере определяется необходимым числом ударов шариков по определенной площади обрабатываемой поверхности. Число ударов шариков, приходящихся на 1 мм<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности, определяется по формуле

$$c = \frac{z \cdot n}{\pi d n_z S_o}. \quad (4.8)$$

В качестве упрочнителя может быть использована ротационная головка с роликами, установленными по винтовой линии подобно зубьям двухзаходной червячной фрезы.

**Обработка вибрационными эксцентриковыми и ультразвуковыми упрочнителями.** Центробежно-шариковые упрочнители при наклепывании детали основную силу удара шарика передают в направлении касательном к поверхности обрабатываемой заготовки. В результате этого поверхностный слой металла деформируется и смещается в тангенциальном направлении. При таком характере деформирования недостаточно точно назначенный режим обработки может вызвать нарушение целостности поверхностных слоев металла, а в ряде случаев – нарушение поверхностного слоя.

При использовании способа динамического наклепа поверхностного слоя металла, при котором сила удара шарика об обрабатываемую поверхность обеспечивается инерционной эксцентриковой массой, в зависимости от необходимости удар деформирующего шарика можно осуществлять в разных направлениях: нормальном, тангенциальном (окружном), осевом и в любом промежуточном направлении (рис. 4.33, а).

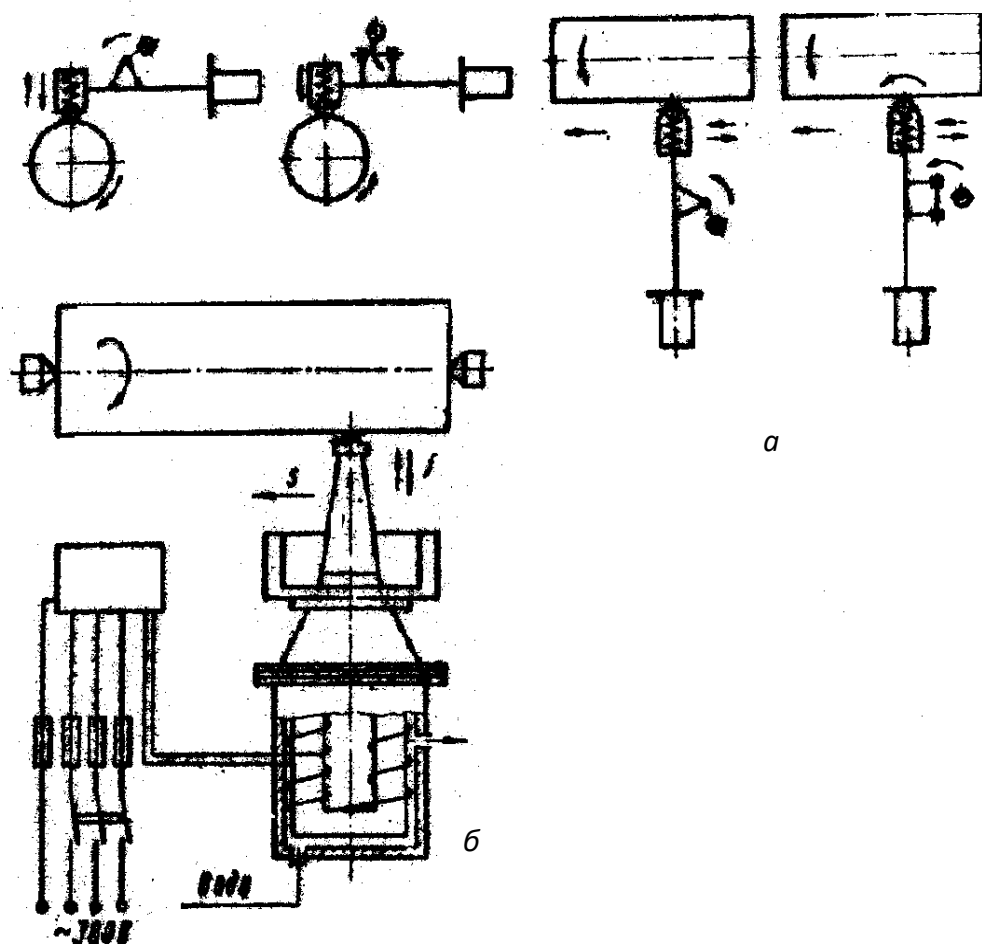


Рис. 4.33. Схема обработки заготовок эксцентриковым шариковым (а) и ультразвуковым (б) упрочнителями.

Получила распространение обработка ППД с ультразвуковыми колебаниями деформирующего инструмента. В процессе ультразвукового упрочнения инструменту сообщаются ультразвуковые колебания в направлении, перпендикулярном к обрабатываемой поверхности, и прикладывается статическое усилие поджима (рис. 4.33, б). Как показали исследования, в том случае, когда инструменту сообщаются колебания ультразвуковой частоты, в зоне обработки температура достигает 1000...1200°С. В результате чего осуществляется не холодное пластическое, а термопластическое деформирование поверхностного слоя металла.

Ультразвуковая обработка повышает поверхностную микротвердость в 1,5...2 раза с глубиной упрочнения 0,3...0,4 мм; снижается шероховатость поверхности; в ней создаются благоприятные напряжения сжатия. Частота колебаний инструмента 18...24 кГц, амплитуда колебаний 10...20 мкм, скорость обработки поверхности детали 0,9... 1,0 м/с. Продольная подача инструмента  $S = 0,125$  мм/об. С целью уменьшения износа инструмента и повышения производительности процесса при упрочнении используют смазочно-охлаждающую технологическую среду — индустриальное масло.

Применение ультразвукового упрочнения особенно эффективно для инструментов, зубьев колес, деталей, изготовленных из чугуна, цветных металлов и сплавов, в том числе твердосплавных, а также для деталей сложной формы

**Упрочняющая чеканка.** Сущность способа упрочнения чеканкой заключается в том, что с помощью специального приспособления — механического, пневматического и электромеханического типа наносят удары по упрочняемой поверхности. В результате удара инструмента (ударника с бойком) изменяется качество поверхности, и в тонком поверхностном слое создаются остаточные напряжения сжатия до 100 кг/мм<sup>2</sup>. Шероховатость поверхности обычно находится в пределах  $R_z = 160...40$  мкм. Глубина наклепа при чеканке может быть получена до 35 мм. Твердость поверхности заготовки, обработанной чеканкой, на 30...50% выше исходной твердости. Для достижения низкой шероховатости поверхности после чеканки следует предусмотреть механическую обработку на глубину до 0,5 мм или сглаживающие проходы по галтелям бойками увеличенных радиусов.

Соответствующим подбором режимов (шага чеканки, количества проходов, скорости и энергии удара бойка) можно достичь равнопрочности ступенчатого вала в галтелях и гладкой части и повысить несущую способность вала в 1,5 раза и более. Способ упрочнения чеканкой наиболее эффективен и

экономически выгоден (по сравнению с обкаткой роликами и шариками) при упрочнении таких элементов деталей машин, как галтели, сварочные швы и др.

**Обработка механическими щетками.** Механические щетки используются для снятия заусенцев, скругления острых кромок, очистки поверхности от окалины, шлака, декоративной отделки поверхностей металлов, дерева и пластмасс, подготовки поверхностей и упрочнения слоя осаживаемого металла при гальванических покрытиях, полирования и упрочнения поверхностей для повышения износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости деталей машин и т.д.

Механическими щетками (рис. 4.34) обрабатываются детали из различных металлов до и после термической обработки. При определенных условиях и режимах обработки можно получить поверхность с шероховатостью  $Ra=0,16...0,08$  мкм.

В процессе обработки деталей дисковая, цилиндрическая или торцовая щетка, установленная на шпинделе станка или непосредственно на валу электродвигателя, приводится во вращение. В момент контакта рабочей поверхности щетки (образованной торцами провололочек) с поверхностью заготовки происходит удар и формирование поверхности детали.

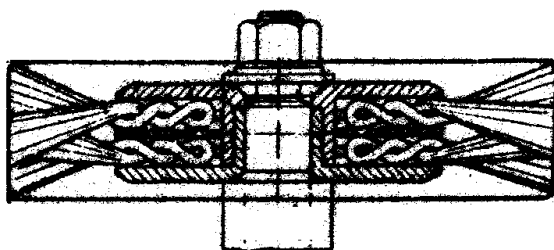
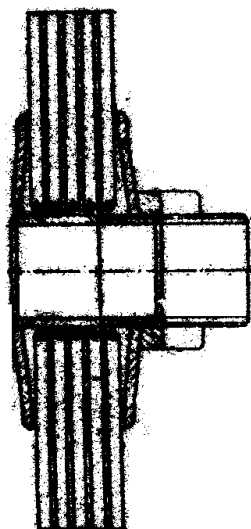


Рис. 4.34. Механические щетки



В процессе вращения щетки с определенной скоростью отдельные ее проволоочки не только срезают и сглаживают вершины гребешков микронеровностей, но и проникают во впадины микропрофиля. При этом все риски, царапины и микротрещины поверхностного рельефа сглаживаются, металл в местах концентрации напряжений упрочняется, что приводит к значительному повышению усталостной прочности обработанных деталей.

Качество поверхности. Получаемое при обработке деталей проволоочными механическими щетками, зависит от высоты микронеровностей исходной поверхности, материала обрабатываемой детали, материала и размера проволоки, идущей на изготовление щетки, скорости деформирования, контактного давления, продолжительности и условий обработки, а также вида смазочно-охлаждающей технологической среды. По конструкции щетки разделяют на кольцевые, дисковые, цилиндрические и иглофрезы (жесткие металлические щетки).

**Обработка дробью.** Обработка дробью – это поверхностное пластическое деформирование металла ударами дроби. Обработка дробью – эффективный и распространенный технологический метод повышения выносливости и износостойкости поверхностным пластическим деформированием деталей. Главной особенностью этого метода является его универсальность. Обработкой дробью можно упрочнять любые сложные поверхности, например такие, как зубья шестерен, витые пружины, рессоры, перо лопаток компрессора и т.п.

Упрочнение сухой дробью в основном осуществляется на дробеструйных и дробеметных установках. В первом типе установок дроби сообщается кинетическая энергия в дробеструйном сопле сжатым воздухом, подаваемым через воздушную форсунку, во втором типе – в центробежном дробеметном колесе (рис. 4.35).

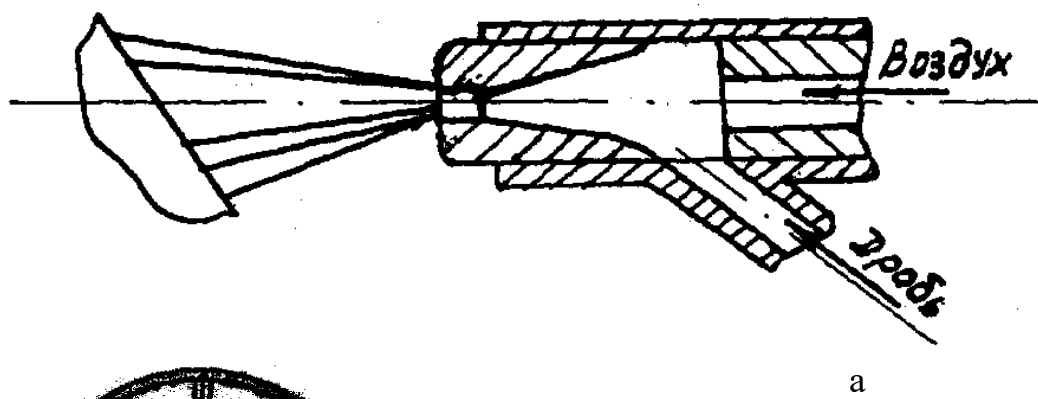


Рис. 4.35. Схемы дробеструйной (а) и дробеметной (б) обработок.

Сущность процесса заключается в том, что поверхность заготовки бомбардируется потоком дробин, летящих с большой скоростью. При ударе о поверхность каждая дробинка оставляет микровмятину, в результате чего поверхностный слой пластически деформируется и упрочняется. Внутренние напряжения сначала растут пропорционально времени обработки, но затем через 1...2 мин наступает «насыщение». Дальнейшая обработка становится уже вредной, так как ведет к появлению микротрещин (перенаклепу).

Оптимальное время обработки и угол падения дроби (70...90°) определяют в зависимости от материала детали и глубины упрочнения экспериментально. Дробь рекомендуется применять стальную возможно меньшего диаметра (0,8...1,0 мм). Размеры дробин должны быть такими, чтобы они попадали на дно галтелей, выточек или канавок. Радиус дроби применяют, равным половине радиуса галтелей. При выборе режимов обработки следует иметь в виду, что на качество обработки оказывает влияние следующие технологические факторы: скорость дроби при встрече с обрабатываемой поверхностью; размер, качество и расход дроби; продолжительность обработки; направление потока дроби (угол атаки); обрабатываемый материал; плотность, с которой дробь покрывает поверхность; расстояние от места вылета дроби. б

От перечисленных технологических факторов дробеструйной обработки зависят шероховатость поверхности, глубина наклепа и остаточные напряжения. Шероховатость поверхности улучшается с увеличением твердости обрабатываемого материала. Практически шероховатость поверхности путем дробеструйной обработки может быть получена от  $R_z = 20$  мкм до  $Ra = 2,5$  мкм, а на твердых материалах – до  $Ra = 0,16$  мкм. Глубина наклепа и остаточные напряжения связаны с пластической деформацией, но их величина в первую очередь определяется физическими и механическими свойствами материала.

Одной из главных характеристик материала, определяющих удельную работу дроби при вдавливании, является динамическая твердость  $H_{дин}$ . Глубина наклепа при дробеструйной обработке может быть определена по формуле:

$$h_{накл} = k \frac{D \cdot v \cdot \sin \alpha}{\sqrt{H_{дин}}}, \quad (4.9)$$

где  $D$  - диаметр дробинки;  $v$  - скорость дробы при встрече с обрабатываемой поверхностью;  $\alpha$  - угол атаки;  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Удары дробы вызывают пластическую деформацию на глубину 0,15...3 мм, в результате улучшаются механические свойства поверхностного слоя при одновременном появлении благоприятных остаточных напряжений сжатия.

Приблизленно средние остаточные напряжения  $\sigma_{\text{накл}}$  в наклепанном слое будут пропорциональны динамической твердости материала:

$$\sigma_{\text{накл}} = mH_{\text{дин}}, \quad (4.10)$$

где  $m$  – коэффициент пропорциональности.

В настоящее время создан гидродробеструйный способ упрочнения, сущность которого заключается в обработке деталей шариками, эжектируемыми смазывающе-охлаждающей технологической средой. Гидродробеструйный способ упрочнения отличается от дробеструйного более высоким качеством обработки поверхности.

**Вибрационная ударная обработка.** Вибрационная ударная обработка (виброгалтовка, виброударная обработка) – это ППД соударением незакрепленных или закрепленных заготовок и рабочих тел в замкнутом объеме при их перемещении, вызванном колебательным движением рабочего органа. Процесс сопровождается последовательным нанесением на поверхность обрабатываемых заготовок большого числа микроударов частицами рабочей среды при их взаимном соударении и скольжении. Удары вызваны действием направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере инерционным вибратором (рис. 4.36). Рабочая камера получает вибрацию от инерционного вибратора. При этом детали и рабочая среда, непрерывно подвергаясь переменным по знаку ускорениям, совершает два вида движения: колебание и медленное вращение всей массы (циркуляционное движение). От стенок рабочей камеры вибрация передается прилегающим слоям рабочей среды, которые передают ее следующим слоям и т.д.

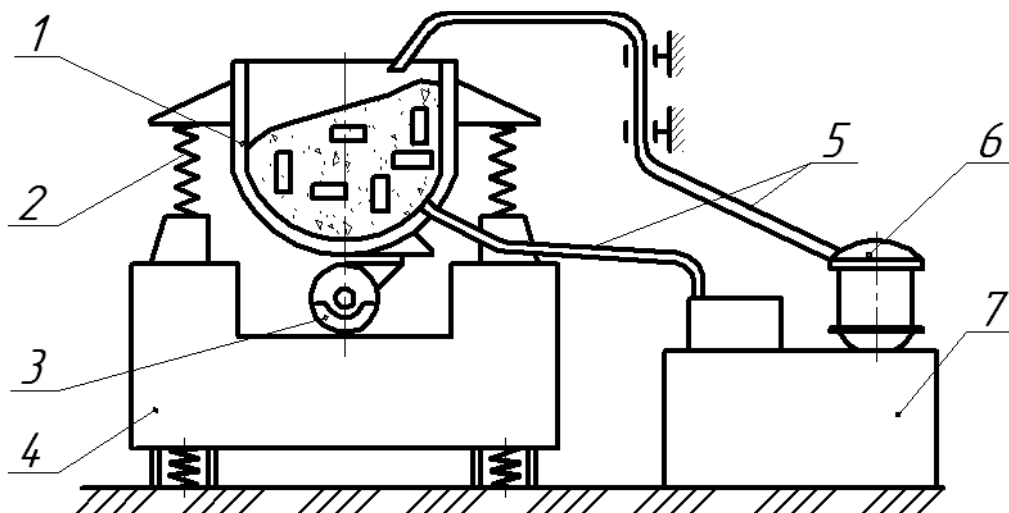


Рис. 4.36. Схема процесса вибрационной обработки: 1 - рабочая камера; 2 - пружины; 3 - дебалансный вибратор; 4 - основание; 5 - шланги для подачи и слива СОТС; 6 - помпа; 7 - бак-отстойник.

В качестве рабочих сред широкое применение в практике виброударной обработки получили стальная и чугунная дробь, литые звездочки, рубленая проволока, стальные полированные шарики и др.

В процессе вибрационного упрочнения обеспечивается пластическое деформирование поверхностного слоя, следствием чего является повышение микротвердости, образование сжимающих остаточных напряжений первого рода и уменьшение шероховатости поверхности.

Виброударное упрочнение является универсальным методом упрочнения обработки. Наиболее наглядны его преимущества при обработке деталей сложной формы, а также при упрочнении деталей небольших размеров разнообразной номенклатуры. Интенсивность виброударной обработки зависит от режима и продолжительности обработки, характеристик и размеров частиц рабочей среды, объема рабочей камеры и степени ее заполнения, механических свойств материала обрабатываемых деталей и др.

Данная схема обработки является универсальной. Она может применяться и для чисто отделочной обработки (виброшлифование, виброполирование), когда в качестве рабочей среды применяется формованный абразив.

#### **4.5 Реновационные технологии продления жизненного цикла деталей машин.**

##### **3.5.1. Применение сварки для ремонта и восстановления изделий**

Технологические процессы сварки и наплавки занимают ведущее место при восстанавливаемых изделий, поскольку с их помощью восстанавливают почти 70 % всех деталей.

Согласно ГОСТ 2601-84 *сваркой* называется получение неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании. В условиях ремонтно-восстановительного производства сварку следует рассматривать как процесс установления неразъемных соединений между восстанавливаемым слоем и основной частью материала ренодетали или ее элементами. Большое разнообразие форм и размеров ренодеталей обуславливает необходимость применения в ремонтно-восстановительном производстве разных видов сварки.

**Ручная дуговая сварка.** Ручную дуговую сварку выполняют, как правило, металлическими электродами при питании дуги постоянным или переменным током. Схема процесса представлена на рис. 4.37. К электроду и свариваемому изделию для образования и поддержания сварочной дуги от источников сварочного тока подводится постоянный или переменный сварочный ток. Сварочная дуга 1 горит между металлическим стержнем электрода 2 и основным металлом 3. Под действием тепла дуги металл дуги электрода, покрытие электрода и основной металл расплавляется, образуя сварочную ванну 4. Капли жидкого металла 5 с торца расплавленного электродного стержня переносятся в ванну через дуговой промежуток. Вместе со стержнем плавится покрытие электрода 6, образуя вокруг дуги газовую защиту 7 и жидкую шлаковую ванну 8. По мере движения дуги, металл сварочной ванны затвердевает, образуется сварочный шов 9 и шлаковая корка 10 на поверхности шва.

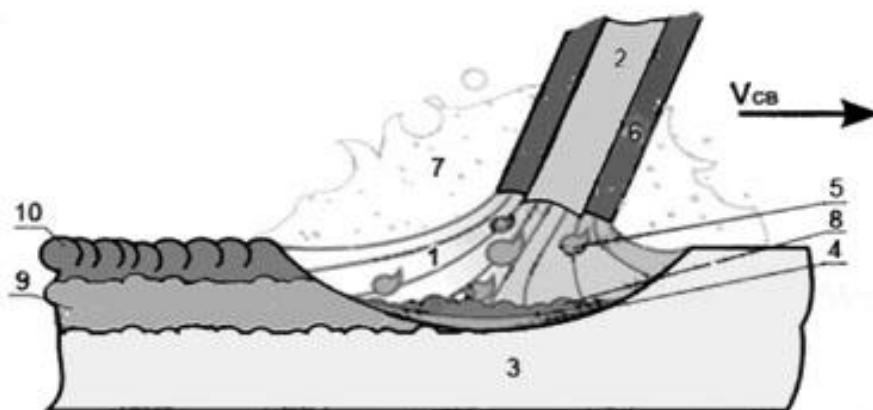


Рис. 4.37. Ручная дуговая сварка

Источниками постоянного тока при ручной, автоматизированной сварке являются преобразователи, выпрямители и агрегаты с приводом от двигателя внутреннего сгорания; источниками переменного тока — сварочные трансформаторы. Сварку выполняют электродами с обмазкой. При выборе электродов необходимо учитывать их назначение. Если электроды применяют

для сварки разрушенных деталей, то их выбирают исходя из условий максимального приближения качества и свойств материала шва к металлу восстанавливаемой детали, чтобы твердость была одинаковой на всех участках. Электроды для сварки обозначают буквой «Э» и двумя цифрами, например Э-42. Цифры после буквы свидетельствуют о прочности шва на разрыв. Электроды для наплавки обозначают двумя буквами «ЭН» и цифрами, показывающими гарантированную твердость наплавленного слоя. Наплавочные электроды специального назначения обозначают тремя буквами. Например, электрод типа ЭНР-62 расшифровывается так: электрод для наплавки режущего инструмента обеспечивает твердость слоя 62...63 HRCэ. Каждому типу электрода может соответствовать несколько марок обмазки. Обмазки электродов по составу подразделяют: на руднокислые — *P*, рутиловые — *T*, фтористо-кальциевые — *Φ*, органические — *O*. Наибольшее распространение в реновационной практике получили группы *P*, *T* и *Φ*.

**Газовая сварка.** Техника выполнения газовой сварки и режимы процесса в значительной степени влияют на качество сварного соединения. При ручной сварке пламя направляют на свариваемые кромки так, чтобы они находились в восстановительной зоне на расстоянии 2...6 мм от конца ядра. Положение горелки (угол наклона ее мундштука к поверхности свариваемого металла) зависит от толщины соединяемых кромок реноизделия и теплопроводности металла. Чем толще металл и чем больше его теплопроводность, тем должен быть больше угол наклона мундштука горелки. Схема процесса представлена на рис. 4.38.

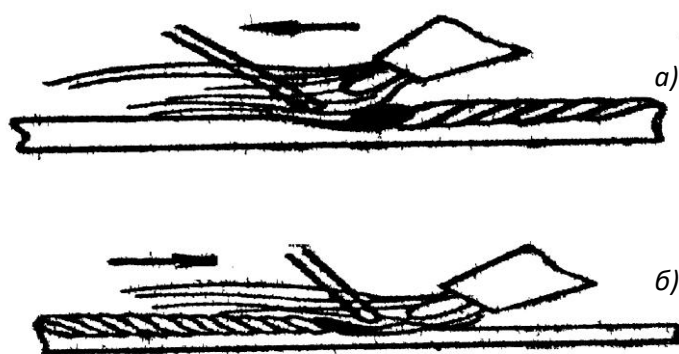


Рис. 4.38. Основные способы газовой сварки: *а)* – правый способ; *б)* — левый способ.

Различают два основных способа газовой сварки: правый и левый. При правом способе (рис. 4.38, *а*) процесс сварки ведется слева направо. Горелка перемещается впереди присадочного прутка, а пламя направлено на формирующийся шов. Этим обеспечивается хорошая защита сварочной ванны от воздействия атмосферного воздуха и замедленное охлаждение сварного шва. Такой способ позволяет получить швы высокого качества. Углы наклона мундштука горелки выбираются в зависимости от толщины свариваемого металла.

При левом способе (рис. 4.38, *б*) процесс сварки выполняют справа налево. Горелка перемещается за присадочным прутком, а пламя направляется на несваренные кромки и подогревает их, подготавливая к сварке.

Правый способ применяют при сварке металла толщиной более 5 мм. Пламя горелки при этом способе ограничено с двух сторон кромками изделия, а позади — наплавленным валиком, что значительно уменьшает рассеивание теплоты и повышает степень ее использования. Однако при левом способе внешний вид шва лучше, так как сварщик отчетливо видит шов и может получить его равномерным по высоте и ширине. Это особенно важно при сварке тонких листов. Поэтому тонкий металл сваривают левым способом. Кроме того, при левом способе пламя свободно растекается по поверхности металла, что снижает опасность его пережога.

Выбор способа сварки зависит от пространственного положения шва. При сварке швов в «нижнем положении» выбор способа сварки, как указывалось ранее, зависит от толщины металла. Сварку вертикальных швов снизу вверх выполняют левым способом. (рис. 4.39, *б*)

Сварку на вертикальных поверхностях горизонтальными швами выполняют левым способом, направляя пламя горелки на заваренный шов.

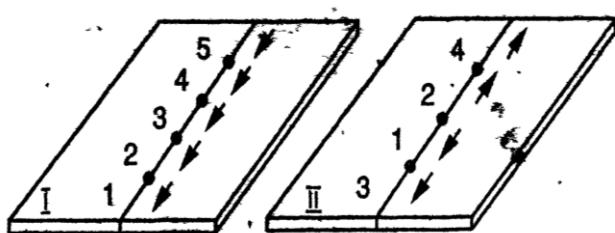


Рис. 4.39. Схемы горизонтального и вертикального способов сварки: *а*) горизонтальный способ. *б*) вертикальный способ.

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

Подготовка кромок состоит в очистке их от масла, окалины и других загрязнений, разделке под сварку и прихвате короткими швами. Скос кромок выполняют ручным или пневматическим зубилом, а также на кромкострогальных или фрезерных станках. Экономичным способом подготовки кромок является ручная или механизированная кислородная резка.

Основные параметры режима сварки выбирают в зависимости от свариваемого металла, его толщины и типа реноизделия. Определяют необходимую мощность пламени, вид пламени, марку и диаметр присадочной проволоки, технологию сварки. Швы накладывают одно- и многослойные. При толщине металла до 6...8 мм применяют однослойные швы, до 10 мм — в два слоя, более 10 мм — в три слоя и более.

После сварки рекомендуют проковку металла шва в горячем состоянии и последующую нормализацию при температуре 800...900°C. После этого металл приобретает достаточную пластичность и мелкозернистую структуру.

**Сварка чугуна.** Все виды горячей сварки проводят при нагреве до 680°C и более. Структура сложных чугунных ренодеталей, например, блоков картеров, головок цилиндров двигателей внутреннего сгорания, задних мостов и корпуса коробок передач тракторов, в разных частях этих деталей неодинакова. К сварным соединениям чугунных ренодеталей предъявляются следующие требования: возможность обработки обычным режущим инструментом, прочность металла шва должна быть не ниже прочности основного металла, зона термического влияния (часть основного металла, которая в процессе сварки поддается термическому влиянию) должна быть минимальной, равнопрочность соединения, однородность наплавленного и основного металла ренодетали по химическому составу и структуре.

По состоянию свариваемых ренодеталей выделяют два способа сварки — *горячий и холодный*.

*Горячая сварка чугуна* — операция, при которой деталь нагревают (в печи или другим способом) до температуры 650...680 °C. Во время сварки местную температуру ренодетали поддерживают не ниже 500°C. Подогрев освобождает свариваемую ренодеталь от внутренних напряжений литейного и эксплуатационного характера и предупреждает появление сварочных напряжений и трещин. В некоторых случаях для отдельных деталей (например, головок блоков цилиндров дизельных двигателей, блоков автомобильных двигателей), имеющих большую жесткость и сложную конфигурацию, при сварке обязателен общий нагрев. Применение многослойного сварного шва оказывает большое влияние на его структуру и среднее количество углерода по сечению сварного шва и термическое воздействие (отжиг и отпуск) на предыдущие слои. При сварке обязательно применение флюса, который

повышает свариваемость чугуна; предохраняет от окисления расплавленную ванну; увеличивает жидкотекучесть сварочных шлаков.

При сварке трещин в чугунных ренодеталях выполняют следующие операции. С кромок трещин снимают фаски так, чтобы угол разделки равнялся  $70...80^\circ$ , которые грубо обрабатывают (желательно с образованием насечки). Очищают места сварки от грязи, масла и ржавчины. Подготовленные к сварке места подогревают пламенем газовой горелки до температуры  $900...950^\circ\text{C}$ .

*Холодная сварка* наиболее часто применяется для устранения трещин и заварки пробоин в тонкостенных корпусных и крупногабаритных чугунных деталях, которые требуют последующей механической обработки и эксплуатируются под нагрузкой при тепловом воздействии. При холодной сварке чугуна ренодеталь не нагревают. Сварочная ванна имеет небольшой объем металла и быстро твердеет. При этом способе ренодетали можно также подогревать (но не выше  $400^\circ\text{C}$ ) для снятия напряжения и предупреждения возникновения сварочных напряжений. Простота выполнения холодной сварки (отсутствие нагрева или небольшой местный подогрев) обеспечивает более широкое ее применение по сравнению с горячей сваркой.

Заварку трещин в тонких (до 10 мм) ненагруженных стенках корпусных ренодеталей проводят без разделки кромок. Дугу возбуждают на расстоянии 10...12 мм от одного конца трещины и ведут сварку в направлении другого конца трещины. При этом валик наваривают на расстоянии 10...12 мм от конца трещины. Сварку трещин в толстостенных деталях, которые в дальнейшем подвергаются механической обработке или работают под нагрузкой, проводят с разделкой кромок. Ширина разделки краев трещины под сварку на поверхности детали должна быть в 2 раза больше ее толщины, а глубина разделки — на 2...3 мм меньше этой толщины.

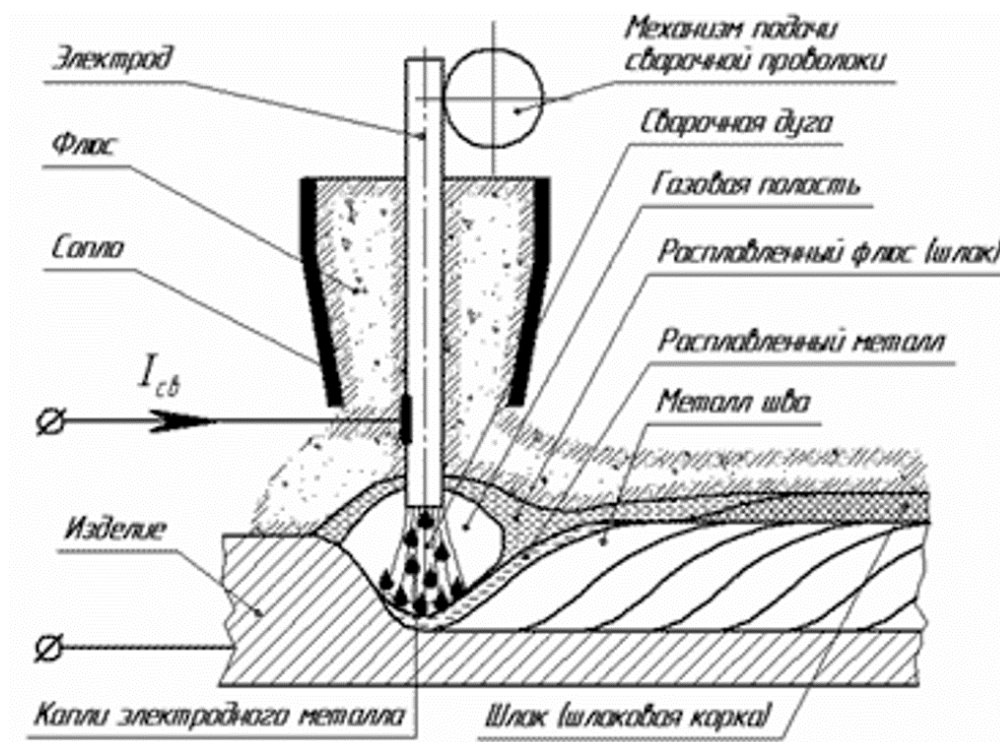
### **3.5.2 Применение наплавки для ремонта и восстановления изделий.**

Наплавка по сравнению с другими способами восстановления дает возможность получать на поверхности ренодеталей слой необходимой толщины и нужного химического состава, высокой твердости и износостойкости. Наиболее известные способы наплавки: электродуговая под слоем флюса, дуговая в среде углекислого газа, наплавка с газопламенной защитой, вибродуговая, наплавка порошковой проволокой, электрошлаковая, плазменная наплавка, газопламенная и электроннолучевая.

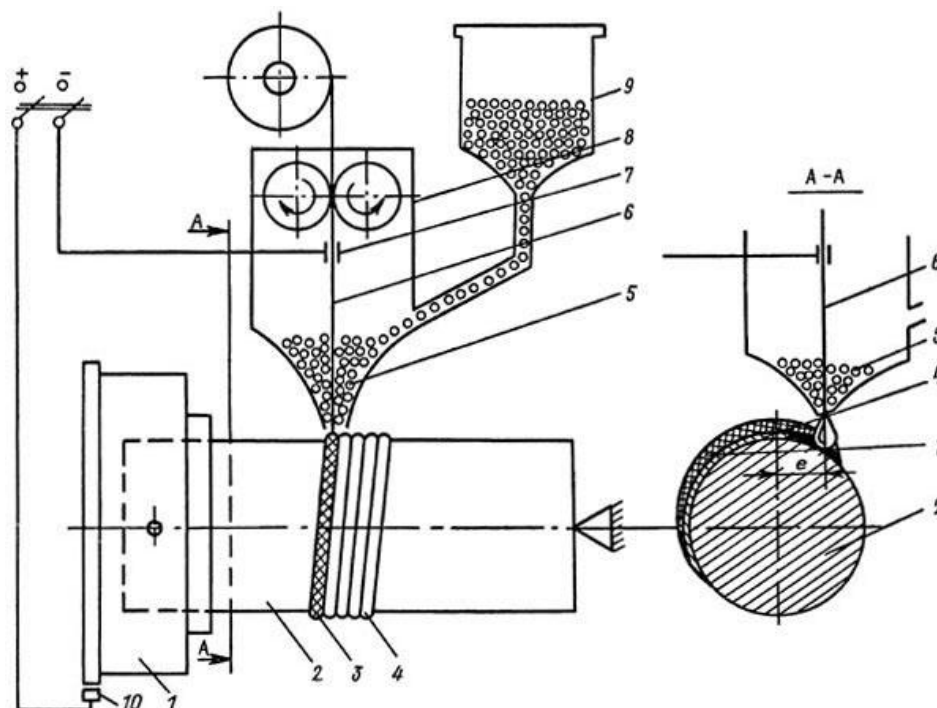
*Электродуговая наплавка под слоем флюса.* При такой наплавке в зону горения дуги подают сыпучий флюс, состоящий из отдельных мелких крупиц (зерен). Под воздействием высокой температуры часть флюса плавится, образуя вокруг дуги эластичную оболочку, которая надежно защищает расплавленный

металл от действия кислорода и азота. Наплавку под слоем флюса применяют для восстановления многих ренодеталей тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин. Автоматическая наплавка эффективна в тех случаях, когда нужно наплавить слой толщиной более 3 мм (например, при выполнении наплавки на ренодеталях ходовой части тракторов и сельскохозяйственных машин — катках, цапфах, роликах, осях и т.д.). Принципиальная схема процесса автоматической наплавки под слоем флюса представлена на рис. 4.40.

К недостаткам наплавки деталей под слоем флюса относятся большая зона термического влияния, значительный нагрев деталей малых размеров, снижение усталостной прочности деталей на 20—40 %



а



б

Рис. 4.40. Схема процесса автоматической (а) и полуавтоматической (б) наплавки под слоем флюса: 1 — патрон токарно-винторезного станка; 2 — восстанавливаемая деталь; 3 — слой шлака; 4 — наплавленный металл; 5 — флюс; 6 — электродная проволока; 7 — контакт провода от источника тока с электродной проволокой; 8 — наплавочная головка; 9 — бункер с флюсом; 10 — контакт провода от источника тока с медной шиной патрона (деталью); е — смещение электрода относительно вертикальной оси детали (эксцентриситет электрода).

Для наплавки под слоем флюса применяют устанавливаемые на токарных станках или специальных установках головки типов А-580, ОКС-1031Б, ОКС-1252М и др. Качество наплавленного металла и его износостойкость зависят от марки электродной проволоки, флюса и режима наплавки.

**Наплавка порошковой проволокой.** Хорошие результаты при наплавке дает использование порошковой проволоки, в состав которой входят феррохром, ферротитан, ферромарганец, графитовый и железный порошки. Наплавку выполняют под слоем флюса или в среде защитного газа, но при введении в проволоку соответствующих компонентов возможна наплавка и без флюсовой или газовой защиты. Исходным материалом порошковой проволоки служит лента из низкоуглеродистой стали и порошок, содержащий необходимые элементы. Используют два типа порошковой проволоки для наплавки под флюсом и для наплавки открытой дугой. Твердость и относительная износостойкость наплавленного металла в зависимости от марок электродной

проволоки и флюса. На рис. 4.41. представлена схема процесса наплавки порошковой проволокой.

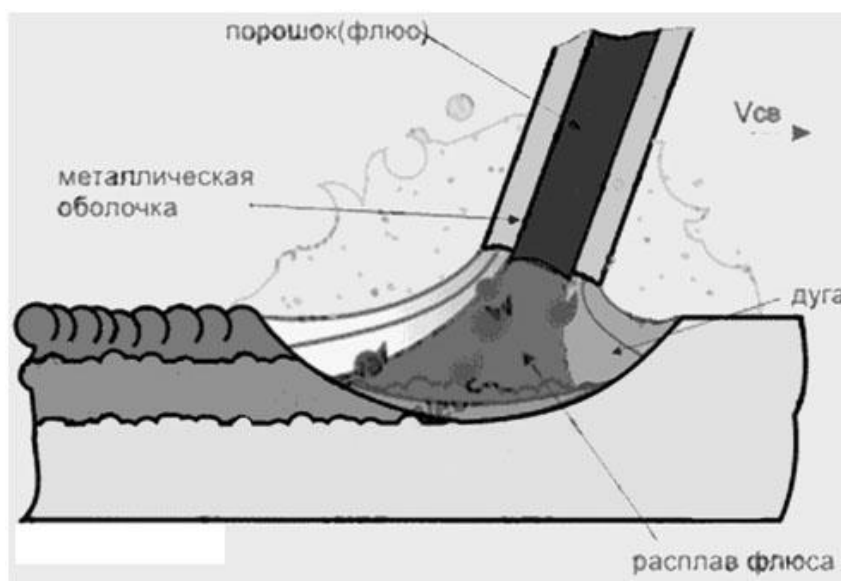


Рис. 4.41. Схема процесса наплавки порошковой проволокой

Этот способ обладает преимуществами перед другими: он позволяет увеличить силу тока, т.е. повысить производительность процесса в 2 раза и более; исключается операция отделения шлаковой корки от ренодетали после наплавки. При этом способе при наплавке, например, на сталь 45 (материал коленчатых валов) обеспечивается трооститномартенситная структура металла, твердость 51,5....57 HRC; износостойкость поверхности получается в 1,6....2 раза выше, чем у стали 45, закаленной токами высокой частоты (ТВЧ).

Для наплавки порошковой проволокой используют токарные станки с головками А-580М, ОКС-1252М, А-765, А-1197, а также специальные станки УД-139, УД-140, УД-143, УД-144, УД-209, УД-233, У-651, У-653, ОКС-11200, ОКС-11236, ОКС-11238, ОКС-14408. Источниками питания дуги являются преобразователи ПСГ-500, выпрямители ВДУ-504, ВДУ-301, ВДУ-1001, ВС-600, ВДМ-1001. Использование порошковой проволоки позволяет снизить расход сварочной проволоки. наплавку порошковой проволокой и лентой выполняют при постоянном токе обратной полярности. Диаметр электродной проволоки зависит от толщины наплавленного металла с припуском под механическую обработку 0,8...1,5 мм на сторону. Силу тока выбирают в зависимости от скорости наплавки и диаметра проволоки.

**Наплавка в среде углекислого газа.** Этот способ в значительной степени отличается от других способов восстановления ренодеталей — не нужно ни флюсов, ни электродных покрытий. Дуга между электродом и наплавляемым изделием горит в струе газа, вытесняющего воздух из плавильного пространства

и защищающего расплавленный металл от воздействия кислорода и азота. Автоматическая наплавка в среде углекислого газа. Имеет следующие преимущества: при наплавке отсутствуют вредные выделения и шлаковые корки; открытая дуга дает возможность наблюдать и корректировать процесс, проводить наплавку при любом пространственном положении наплавляемой плоскости, механизировать наплавку, выполняемую на мелких ренодеталях (валах диаметром 10 мм и более).

Для наплавки применяют следующее оборудование: наплавочные головки АБС, А-384, А-409, А-580, ОКС-1252М; источники питания ВС-200, ВСУ-300, ВС-400, ПСГ-350, АЗД-7,5/30; подогреватели газа; осушитель, заполненный силикагелем КСМ крупностью 2,8...7 мм; редукторы-расходомеры ДРЗ-1-5-7, или ротаметры РС-3, РС-3А, РКС-65, или кислородный редуктор РК-53Б.

Наплавку в среде углекислого газа выполняют на постоянном токе обратной полярности. Тип и марку электрода выбирают в зависимости от материала восстанавливаемой ренодетали и требуемых физико-механических свойств наплавленного металла. Скорость наплавки устанавливают в зависимости от толщины наплавляемого металла и качества формирования наплавленного слоя. Наплавку валиков осуществляют с шагом 2,5...3,5 мм.. Твердость наплавленного металла в зависимости от марки и типа электродной проволоки 200...300 НВ. Схема процесса представлена на рис. 4.42.

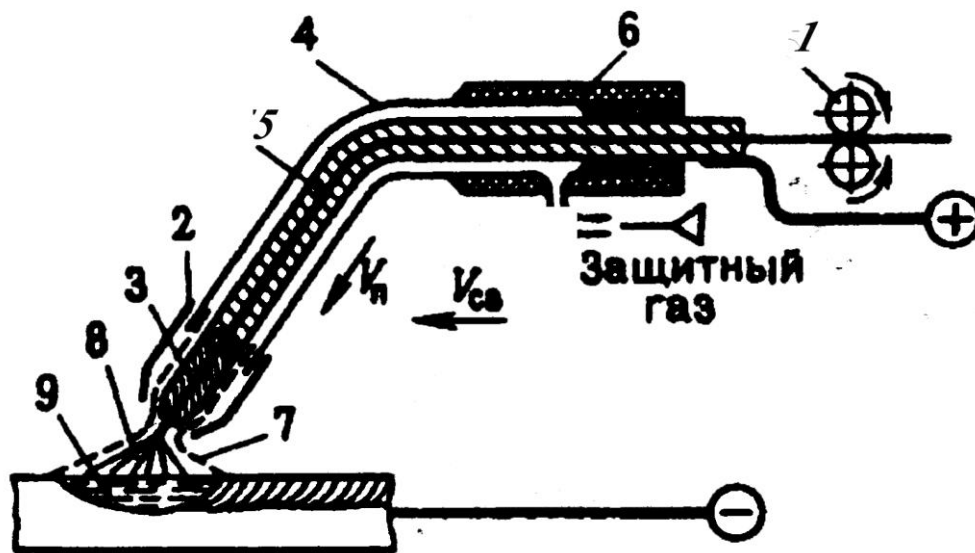


Рис. 4.42. Автоматическая наплавка в среде углекислого газа [19]: 1 - механизм подачи 2 - сопло; 3 - токододводящий мундштук; 4 - корпус горелки 5 плавящийся металлический электрод(наплавочная проволока); 6 - рукоять горелки;7 - атмосфера защитного газа; 8 - сварочная дуга;9 ванна расплавленного металла.

**Вибродуговая наплавка** — разновидность дуговой наплавки металлическим электродом. Технология вибродуговой наплавки предусматривает восстановление деталей с цилиндрическими, коническими наружными и внутренними поверхностями, а также с плоскими поверхностями. Процесс наплавки осуществляется при вибрации электрода с подачей охлаждающей жидкости на наплавленную поверхность. На рис. 4.43. дана принципиальная схема вибродуговой установки с электромеханическим вибратором.

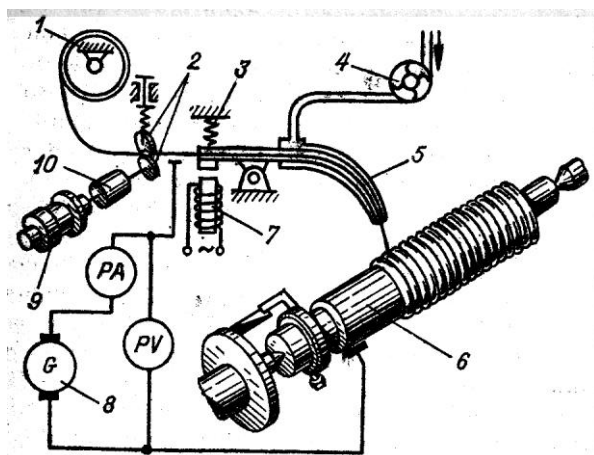


Рис. 4.43. Принципиальная схема вибродуговой установки: 1 – кассета с проволокой; 2 – ролики подающего механизма; 3 – якорь вибратора; 4 – насос для охлаждающей жидкости; 5 – вибрирующий мундштук 6 – ренодеталь; 7 – катушка вибратора; 8 – генератора; 9 – электродвигатель; 10 – редуктор.

На суппорте токарного станка закрепляют наплавочную головку (ОКС-6569 или ОКС-1252). Для питания дуги используют источники постоянного тока с жесткой внешней характеристикой (генераторы АНД-500/250, выпрямители ВС-300 и ВС-600, преобразователи ПД-305 и ПСГ-500).

К наплавляемой поверхности ренодетали, которая вращается в центрах токарного станка, роликами подающего механизма из кассеты через вибрирующий мундштук подается электродная проволока. Из-за колебаний мундштука, вызываемых электромеханическим вибратором, проволока периодически прикасается к поверхности ренодетали и расплавляется под действием импульсных электрических разрядов, поступающих от генератора. Под действием вибратора мундштук вместе с проволокой вибрирует с частотой 110 Гц и амплитудой колебания до 4 мм (практически 1,8...2мм). Вибрация электрода во время наплавки обеспечивает стабильность процесса за счет частых возбуждений дуговых разрядов и способствует подаче электродной проволоки небольшими порциями, что обеспечивает лучшее формирование наплавленных валиков. Благодаря вибрациям процесс наплавки может быть осуществлен при

низком напряжении (12...18 В). Охлаждающая жидкость (4...6 %-ный раствор кальцинированной соды в воде) защищает металл от окисления.

Для наплавки внутренних цилиндрических поверхностей головку размещают на станке так, чтобы плоскость мундштука совмещалась с осью ренодетали. Ренодеталь приводят во вращательное движение, головку — в поступательное. Толщина однослойной наплавки в зависимости от режимов колеблется от 0,5 до 3 мм. При многослойной наплавке можно получить слои любой толщины. Подготовка поверхностей для наплавки состоит в очистке их от грязи и ржавчины. Все отверстия и пазы, которые необходимо сохранить, заполняют медными или графитовыми вставками так, чтобы они выступали над поверхностью на величину, превышающую толщину наплавленного слоя, что позволяет легче удалить их после наплавки.

Вибродуговая наплавка имеет следующие преимущества: небольшой нагрев детали, возможность наплавки деталей с малым диаметром, незначительная зона термического влияния, возможность получения необходимых прочностей наплавленного слоя за счет применения различных марок электродной проволоки.

***Вибродуговая наплавка под слоем флюса.*** Вибродуговая наплавка под слоем флюса имеет ряд преимуществ: дает возможность наплавлять металл только на изношенную часть, что уменьшает трудоемкость последующей механической обработки; получать наплавленный слой без пор и трещин; деформация ренодетали минимальная и не превышает полей допусков посадочных мест; минимальная зона термического влияния. Недостатком вибродуговой наплавки является уменьшение до 40 % сопротивления усталости наплавленных деталей.

***Дуговая наплавка с газопламенной защитой.*** Большими технологическими возможностями при восстановлении деталей широкой номенклатуры в условиях восстановительного производства обладает наплавка с газопламенной защитой.

Способ позволяет наплавлять на ренодетали плотные слои, применяя доступные и относительно дешевые углеродистые проволоки. Металл, наплавленный высокоуглеродистыми проволоками на стальные ренодетали, хорошо воспринимает закалку. Можно также наплавлять стальной низкоуглеродистой проволокой на чугунные ренодетали. Наплавленный слой в этом случае обладает хорошей обрабатываемостью.

Особенностью способа является то, что защитные газы в сварочную зону подаются двумя концентричными потоками: в наружном потоке — природный газ (ГОСТ 5542—78) или пропанбутановую смесь (ГОСТ 20447—80) и во

внутреннем потоке — кислород (ГОСТ 5583—78). На рис. 4.44 представлена схема наплавки реноизделия с газопламенной защитой.

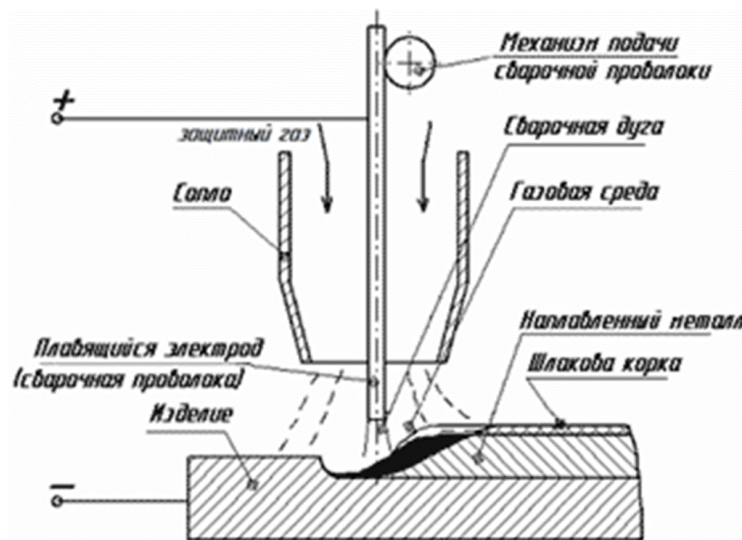


Рис. 4.44. Наплавка с газопламенной защитой [19].

Вредное влияние газа на плотность наплавленного металла подавляется кислородом, который подается узким внутренним потоком в зону дуги. По выходе из горелки газ сгорает, образуя пламя. Таким образом, дуга горит в факеле газокислородного пламени. Для защиты от перегрева в процессе наплавки газовая горелка и головка мундштука снабжены рубашками водяного охлаждения, которые включаются последовательно в систему питания водой. Наплавку выполняют на наплавочных станках УД-209, У-653 или на созданной установке на базе токарного станка. Для создания газопламенной защиты установку оснащают горелкой, системой питания горелки газами и системой охлаждения горелки и наплавляемой ренодетали. Для питания дуги применяют источники с пологопадающей или жесткой характеристикой: ВС-600, ВДУ-505, ВДУ-50, ВДУ-601, ПСГ-500 и др.

**Электрошлаковая наплавка.** Для изготовления биметаллических деталей с износостойким слоем значительной толщины (более 10 мм) применяют электрошлаковую наплавку. В этом процессе используют теплоту, выделяющуюся при прохождении электрического тока через расплавленный шлак. Электрошлаковая наплавка обеспечивает наибольшую производительность по сравнению со всеми другими способами наплавки. С помощью легированных присадок получают наплавленный слой нужного химического состава. Качество наплавленного металла высокое — отсутствуют поры, трещины и другие дефекты.

Наплавку можно выполнять на плоских поверхностях, а также на поверхностях тел вращения. Особенность электрошлаковой наплавки состоит в том, что можно получать гладкие, ровные поверхности наплавленного слоя. Это

дает возможность использовать ренодетали без последующей механической обработки. В начале процесса в зазор между ренодеталью и водоохлаждаемой формой заливают расплавленный флюс и возбуждают дугу между электродной проволокой и ренодеталью. После образования шлаковой ванны достаточной глубины дуга потухает, и ток проходит через расплавленный шлак — начинается электрошлаковый процесс. Расход флюса при этом способе в 15..20 раз меньше, чем при электродуговом. Наплавку осуществляют специальными сварочными аппаратами. По мере заполнения зазора наплавленным металлом ренодеталь перемещают относительно аппарата вниз.

Пример. Режимы электрошлаковой наплавки при восстановлении опорных катков тракторов класса 30кН имеют следующие (оптимальные) значения: напряжение 36...40 В; сила тока 800...900 А; скорость подачи проволоки 3...3,5 м/мин; глубина шлаковой ванны 80 мм; число электродов 2; скорость подачи сормайта 60...85 г/мин; диаметр электродной проволоки, используемой в этом случае, 3 мм. Наплавляемый металл, шлаковая и металлическая ванны удерживаются от вытекания обычно специальными формирующими устройствами - подвижными или неподвижными медными ползунами 5, охлаждаемыми водой 6, или остывающимися пластинами. Верхняя кромка ползуна располагается несколько выше зеркала шлаковой ванны. Кристаллизующийся в нижней части металлической ванны расплавленный металл образует шов 7. Шлаковая ванна, находясь над поверхностью металлической ванны, соприкасаясь с охлаждаемыми ползунами, образует на них тонкую шлаковую корку, исключая тем самым непосредственный контакт расплавленного металла с поверхностью охлаждаемого ползуна и предупреждая образование в металле шва кристаллизационных трещин. На рис. 4.45 представлена схема электрошлаковой наплавки.

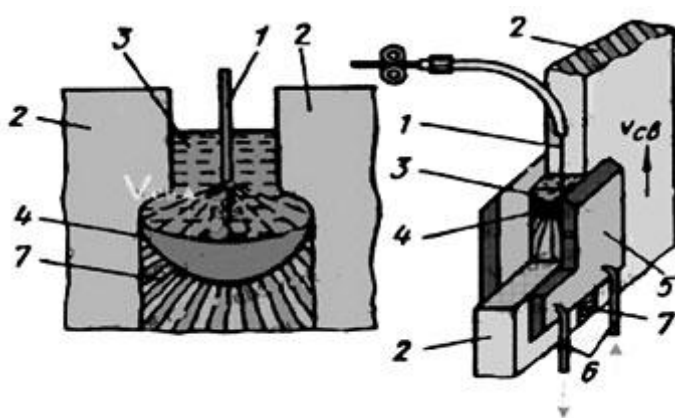


Рис. 4.45. Схема электрошлаковой наплавки

Восстановленные электрошлаковым методом детали подвергаются соответствующей термической и механической обработке.

**Плазменная и микроплазменная наплавка.** Плазменная наплавка — это та же сварка плавлением. Здесь действует тоже электрическая дуга. Но это уже сжатая дуга, которую позволяет получить специальная горелка, плазмотрон. Плазмотрон позволяет получить сжатую дугу с температурой до  $30000^{\circ}\text{C}$ . На рис. 4.46 схематично изображен плазмотрон.

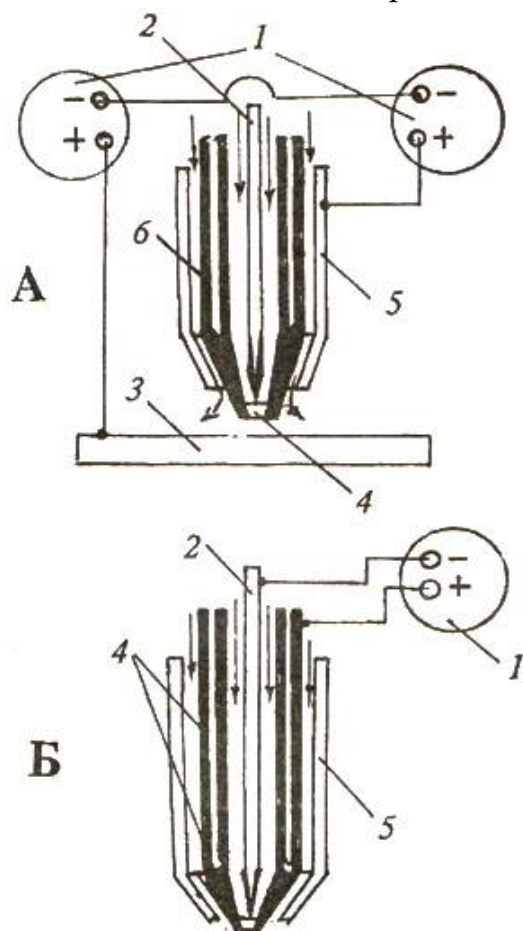


Рис. 4.46. Работа плазмотрона в режиме: А — прямой полярности; Б — дуги косвенного действия (сопло 4 выполняет одновременно роль анода).

Принцип действия плазмотрона, питающаяся от источника 1, заключается в том, что дуга между электродом 2 и изделием 3 проходит через очень маленькое сопло 4. Именно проходя через сопло 4 плазмообразующий газ сжимает дугу. Защитное сопло 5 плазмотрона защищает зону горения от окружающего воздуха. Плазмообразующий и защитный газы проходят по двум независимым друг от друга каналам. В качестве плазмообразующего газа используют инертные газы (гелий, аргон) если речь идет о сварке изделий. Если же предполагается резка металлов, то основу плазмообразующего газа составляет очищенный от примесей воздух.

В зависимости от материала изделия плазменную наплавку проводят на постоянном токе прямой полярности или в импульсном режиме. Для этого плазмотрон соединяют с источником питания 1 постоянного тока или источником питания, обеспечивающим импульсный режим.

Разновидностью плазменной наплавки является микроплазменная наплавка. По конструкции это тот же плазмотрон, но меньших размеров.

**Микроплазменная наплавка.** Микроплазменная наплавка позволяет наплавлять различные материалы, сплавы, даже неметаллические изделия (пластмассы, диэлектрические материалы) вплоть до текстильных изделий. Устройство плазмотрона для микроплазменной наплавки показано на рис. 4.47.

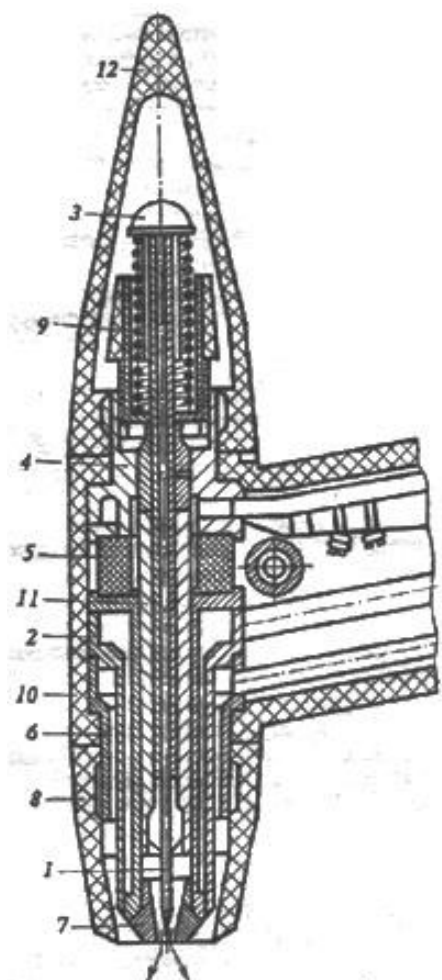


Рис. 4.47. Устройство плазмотрона для микроплазменной наплавки

В корпусе 2 закреплен электрод 1 с помощью цанги 3. Корпус вставляется в верхний каркас 4. Сам каркас соединен с нижним каркасом 6 через керамическую втулку 5. Вставленный во внутреннюю часть сопла 8 наконечник 7 соединен с нижним каркасом 6. Электрод 1 зажимается в цанге 3 с помощью гайки 9 и специальной втулки 11. Внутренняя конструкция плазмотрона заключена в изолирующий корпус 10, который сверху закрывается колпачком 12.

Для производства плазменной и микроплазменной наплавки в настоящее время применяются следующие установки: УПС-501, УПС-804 и УПС-301 для плазменной наплавки и установка А-1342 для микроплазменной наплавки

**Электронно-лучевая наплавка.** Основной компонент — электронный луч, который создается специальным прибором — электронной пушкой. Схема процесса представлена на рис. 4.48.

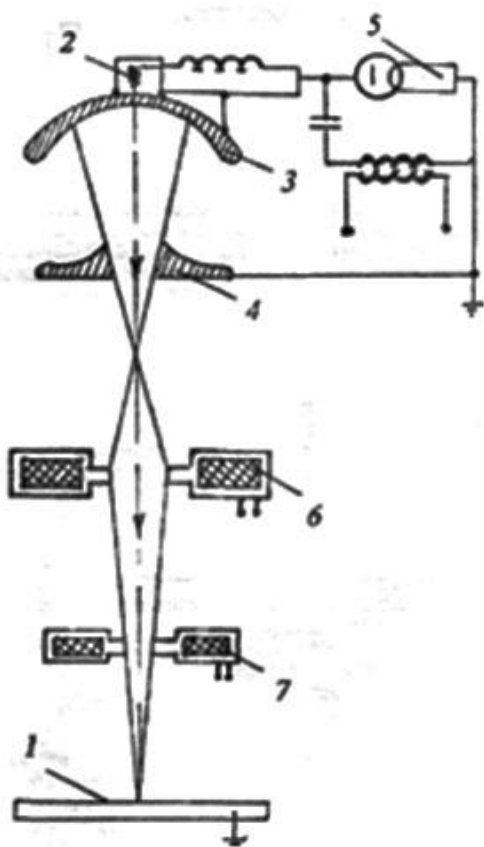


Рис. 4.49. Установка электронно-лучевой наплавки: 1 - реноизделие; 2 - катод; 3 - прикатодный электрод; 4 - ускоряющий электрод; 5 - высоковольтный источник постоянного тока; 6 - магнитная линза; 7 - магнитная отклоняющая система

Пушка имеет катод 2 который может нагреваться до высоких температур. Катод размещен внутри прикатодного электрода 3. На некотором расстоянии от катода находится ускоряющий электрод (анод) 4 с отверстием. Электроны, выходящие из катода, фокусируются с помощью электрического поля между прикатодным и ускоряющим электродами в пучок диаметром, равным диаметру отверстия в аноде 4. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, испускаемые катодом, на пути к аноду приобретают значительную скорость и энергию. Питание пушки электрической энергией осуществляется от высоковольтного источника постоянного тока 5.

Для увеличения плотности энергии в луче после выхода электронов из первого анода электроны фокусируются магнитным полем в специальной магнитной линзе 6. Сфокусированные в плотный пучок летящие электроны ударяются с большой скоростью о малую площадку (пятно нагрева) на реноизделии 1, при этом кинетическая энергия электронов вследствие торможения превращается в теплоту, нагревая металл до очень высоких температур.

Для перемещения луча по свариваемому изделию на пути электронов помещают магнитную отклоняющую систему 7, позволяющую устанавливать луч точно по линии наплавки сварки. Сам по себе электронный луч может достигать таких значений, что делает возможным применение его при сварке больших толщин — до 500 мм.

**Контактная приварка ленты и проволоки.** Суть процесса восстановления контактной приваркой состоит в приваривании мощными импульсами тока к поверхности ренодеталей стальной ленты, порошка или проволоки. Для уменьшения нагрева ренодетали и улучшения закалки привариваемого слоя в зону сварки подают охлаждающую жидкость. Способ восстановления деталей контактным электроимпульсным покрытием широко применяют для восстановления посадочных мест под подшипники в корпусных ренодеталях и валах, а также резьбовых частей валов. Для восстановления и упрочнения реноизделий перспективной является приварка к изношенным поверхностям порошковых твердых сплавов.

При контактной сварке металл прогревается на малую глубину, что обеспечивает неизменность его химического состава и отпадает необходимость в применении флюсов и защитных газов. Для электродов, применяют специальные медные сплавы БрХ1, БрВНТ1,9 и др.

Сварочные точки располагаются по винтовой линии и перекрываются как вдоль рядов, так и между ними на 25% (рис. 4.50), что достигается вращением ренодетали со скоростью, пропорциональной частоте импульсов, продольным перемещением сварочных клещей (электродов), правильным выбором продолжительности импульса тока и паузы. С целью уменьшения нагрева роликовых электродов, ренодеталей и закалки наваренного слоя в зону сварки подают охлаждающую жидкость.

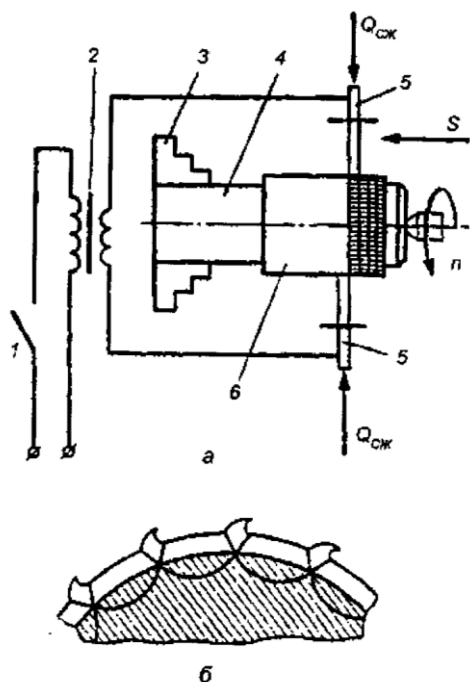


Рис. 4.50. Схема электроконтактной приварки ленты (а) и перекрытия сварочных точек (б): 1 – прерыватель тока; 2 – трансформатор; 3 – патрон; 4 – ренодеталь; 5 – роликовые; 6 – привариваемая лента

Технология восстановления деталей данным способом заключается в шлифовании ренодетали с уменьшением диаметра на 0,3-0,5 мм (отверстие увеличивают), подготовке ленты, ее приварке и последующей обработке приваренного слоя. Заготовки нарезают из лент толщиной 0,3-1 мм в зависимости от износа ренодетали. Ширина их должна быть равна ширине восстанавливаемой поверхности, а длина - длине ее окружности. Зазор в стыке концов ленты не должен быть больше 0,5-0,8 мм, нахлест концов не допускается. С поверхности ленты удаляют следы коррозии и масел.

Контактная наварка имеет ряд преимуществ перед другими способами:

- нанесение покрытия заданной толщины с минимальным припуском на последующую обработку;
- незначительный нагрев и деформация ренодетали;
- малые потери металла и отсутствие выгорания легирующих элементов;
- высокая производительность - до 100 см /мин;
- высокое качество и прочность сцепления покрытия;
- широкие технологические возможности - возможна приварка ленты, проволоки, различных порошковых материалов и т.д.;
- повышение износостойкости покрытий в несколько раз при приварке композиционных материалов (порошков, отходов шлифовального производства и др.).

### 3.5.3. Напыление металлических покрытий

**Газопламенное напыление порошковых материалов.** Основа процесса газопламенного нанесения — пластификация порошка в высокотемпературном

источнике тепла (ацетилено-кислородном пламени) и нанесение его газовыми потоками на предварительно подготовленную изношенную поверхность.

Преимущества газопламенного нанесения состоят в высокой производительности процесса, локальности обработки, незначительном влиянии на подложку, возможности нанесения покрытий на изделия больших размеров, отсутствии ограничений на сочетания материалов покрытия и подложки, что позволяет охватить большую номенклатуру восстановления изношенных ренодеталей.. Рассматриваемый способ позволяет, восстанавливать детали типа вала с износом до 2,5 мм на сторону. Восстановленные детали устойчивы против коррозии, абразивного изнашивания, действия высоких температур. На рис. 4.51 показан процесс газопламенного напыления.

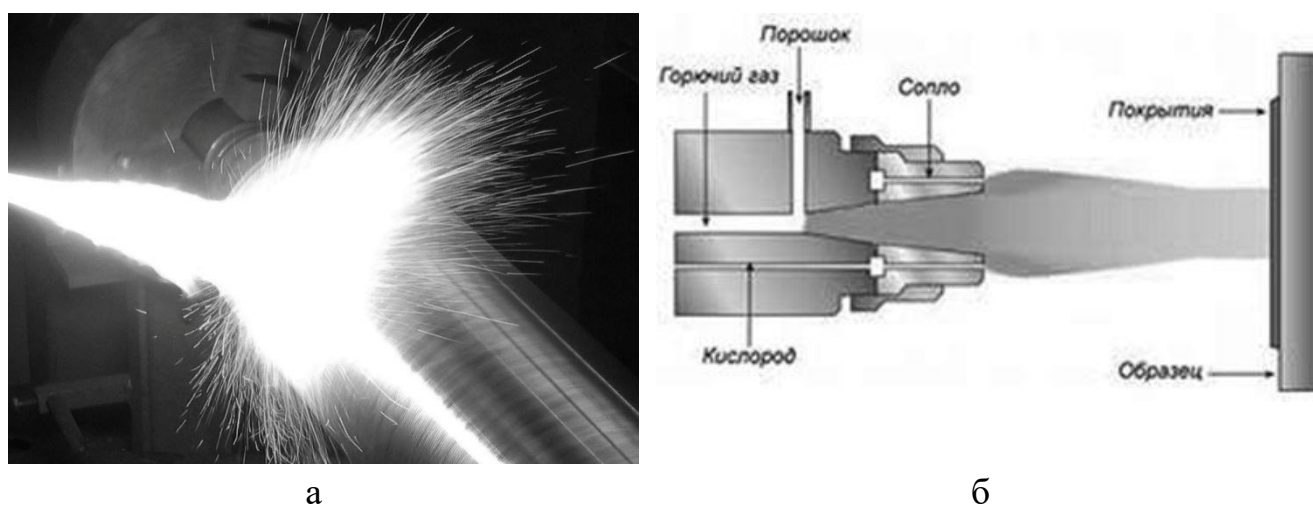


Рис. 4.51. Процесс газопламенного напыления

Технологический процесс газопламенного нанесения, в основном, состоит из трех этапов: нагрева поверхности детали до 200...250 °С; нанесения подслоя, который дает основу, необходимую для наложения основных слоев; нанесения основных слоев, позволяющих получить покрытия с необходимыми физико-механическими свойствами. К основным факторам, влияющим на прочность сцепления покрытия с основой, относятся: способ подготовки поверхности и используемый при этом абразивный материал, параметры струйной обработки поверхности, время выдержки после обработки, наличие предварительного подогрева, применение подслоя и использование термореагирующих порошков, способ распыления, эффективная мощность пламени, параметры процесса распыления, состав материала покрытия (наличие поверхностно-активных добавок в покрытии зависит и от применяемого оборудования и от присадочных материалов). Основой конструкции аппаратов для напыления и горелок для наплавки является базовая схема сварочной горелки. Сварочная горелка служит для смешивания горючего газа с кислородом и получения газового пламени.

Мощность, состав и форма сварочного пламени зависят от мундштуков наконечников горелок. Сварочные горелки подразделяют:

- по способу подачи горючего газа и кислорода в смесительную камеру на инжекторные и безынжекторные;
- по роду применяемого горючего газа на ацетиленовые и для газов заменителей;
- по назначению на универсальные (сварка, наплавка) и специализированные (выполнение одной операции);
- по форме пламени на однопламенные и многопламенные;
- по мощности пламени на микромощные (до 60 л/ч), малой мощности (до 700 л/ч), средней мощности (до 2500 л/ч), большой мощности (до 7000 л/ч);
- по способу применения на ручные и машинные.

Горелки для газопламенной наплавки, выполненные на базе сварочных горелок, отличаются от этих горелок принципом работы и конструкцией (в аппаратах и горелках предусмотрен питатель (бункер) с порошковым материалом). Основное назначение аппарата для напыления — подавать порошок в ядро факела пламени. На рис. 4.52 представлена типовая схема установки газоплазменного напыления порошкового материала

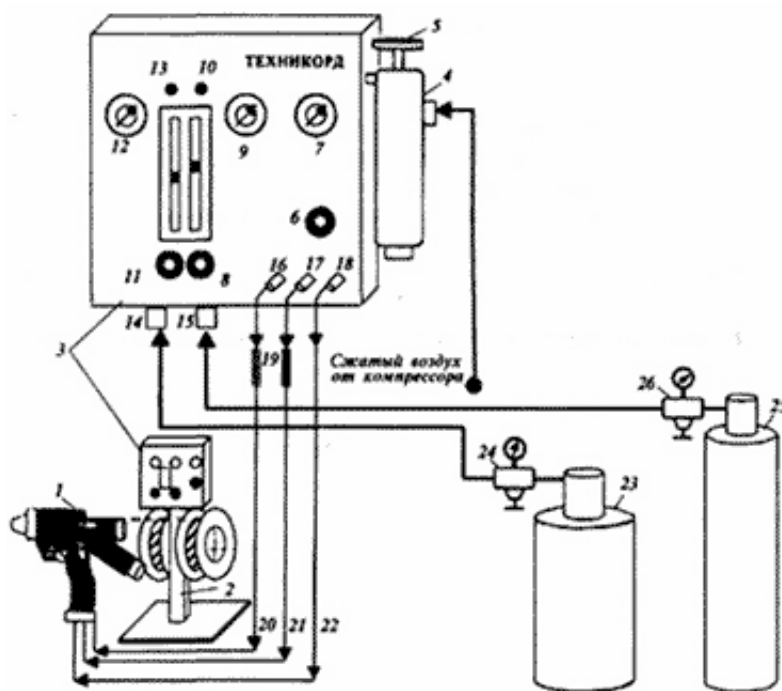


Рис. 4.52. Установка газоплазменного напыления порошкового материала: 1 — порошковый бункер; 2 — направляющая трубка; 3 — многотепловой наконечник; 4 — база сварочной горелки.

Установка состоит из пульта управления, термораспределительного пистолетного устройства для его крепления в суппорте токарного станка. Пульт управления служит для настройки рабочих режимов напыления с помощью манометров, регулирующих расход газов, обратных клапанов и других элементов, обеспечивающих безопасную и стабильную работу пистолета.

**Газотермическое напыление.** При ремонте изделий с помощью газотермического напыления восстанавливают размеры изношенных деталей (шеек валов лесопильных рам, валов деревообрабатывающих станков, шеек осей конвейеров и тележек и т.д.), уменьшают внутренние размеры изношенных посадочных отверстий под подшипники, втулки и другие детали; наносят на подшипники и втулки антифрикционные покрытия из псевдосплавов, образуемых в результате одновременного распыления двух или трех разных металлов. Этот вид напыления характеризуется своей простотой, технологической доступностью и компактностью. Газотермическое напыление дает стойкие антикоррозионные, жаростойкие, электроизоляционные и износостойкие покрытия. Толщина слоя покрытия от 0,1 мм до 15,0 мм. Оптимально 0,5..3,0 мм. Припуски под последующую обработку минимальны и составляют 10-15% от толщины покрытия. Поверхности могут быть восстановлены неоднократно.

Существуют дуговые и газоплазменные способы нанесения покрытий. Дуговые способы покрытия энергетически выгодны, однако пригодны лишь для распыления металлических стержней. Для порошковых материалов приемлем только газопламенный способ. Перед началом напыления поверхность деталей необходимо очищать механическим, а если потребуется, то и химическим путем.

В данной области используются установки и аппаратура порошкового и проволочного типов. Установка УГПЛ предназначена для ручного напыления термопластовых, цинковых и других материалов с температурой плавления 800°C. В этих установках в качестве напыляемого материала используют порошок. При работе установки используют ацетилен и воздух. Установка УГПТ предназначена для ручного напыления тугоплавких покрытий из хромборникелевых сплавов. Напыляемый материал — порошок. Рабочие газы — ацетилен или кислород. Установка МГИ-4П предназначена для ручного напыления деталей из алюминия, стали, цинка. Напыляемый материал — проволока. Используемые газы — кислород, воздух, бутан, пропан. Установка МГИ-4 имеет те же характеристики, что, и МГИ-4П, но использует только ацетилен, кислород и воздух.

Технологические возможности газотермического напыления:

- газотермическое напыление можно использовать на объектах любых размеров: мосты, суда, трубопроводы, строительные конструкции, котлы, коленчатые валы, лопатки турбин и др.;
- толщина покрытия может составлять от 0,01 до 10 и более мм; они могут иметь заданную пористость (от 0 до 30 и более процентов);
- наносить можно любые материалы, имеющие точку плавления или интервал размягчения;

- в качестве подложки можно использовать дерево, стекло, пластмассы, керамику, композиционные материалы, металлы;
- нанесение покрытий может производиться в широком диапазоне состава покрытия, температуры и давления - в низком вакууме в специальной камере контролируемой инертной атмосферой, в воздухе при нормальных условиях, подводой;

**Металлизация.** Металлизация – один из распространенных способов получения металлических покрытий поверхностей нанесением на эти поверхности расплавленного металла. Сущность процесса состоит в следующем: металл, расплавленный дугой (при электрометаллизации) или ацетиленокислородным пламенем (при газовой металлизации) и распыленный струей сжатого воздуха (давление до 0,6 МПа), покрывает поверхность восстанавливаемой детали. Процесс дуговой металлизации осуществляют специальным аппаратом — металлизатором. Аппарат (рис. 4.53) действует следующим образом. С помощью протяжных роликов по направляющим наконечникам непрерывно подаются две проволоки, к которым подведен электрический ток. Возникающая между проволоками электрическая дуга расплавляет металл. Одновременно по воздушному соплу в зону дуги поступает сжатый газ под давлением 0,6 МПа. Большая скорость движения частиц металла (120...300 м/с) и незначительное время полета, исчисляемое тысячными долями секунды, обуславливают в момент удара о ренодеталь ее пластическую деформацию, заполнение частицами неровностей и пор поверхности детали, сцепление частиц между собой и с поверхностью, в результате чего образуется сплошное покрытие.

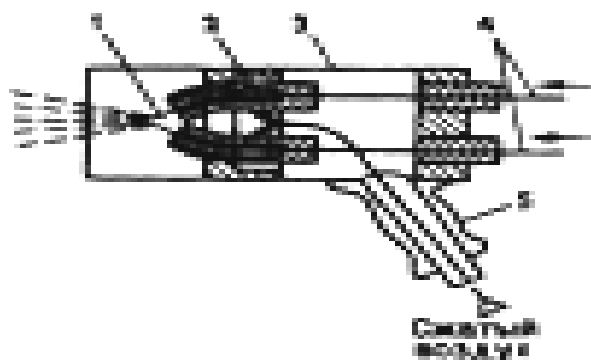


Рис. 4.53. Схема принципа действия металлизатором: 1 – проволока; 2 – мунштук; 3 – корпус; 4 – проволока; 5 – рукоятка

Последовательным наслаиванием расплавленного металла можно получить покрытие, толщина слоя которого может быть от нескольких микрон до 10 мм и более (обычно 1...1,5 мм для тугоплавких и 2,5...3 мм для легкоплавких металлов). Такие покрытия из недефицитных металлов отличаются

высокими антифрикционными свойствами, их используют взамен специальных баббитов и бронз. Из-за пористости напыленного слоя металла в него впитывается некоторое количество масла. Это улучшает условия смазывания и обеспечивает длительную работу этих деталей без смазки, но и без заеданий.

В зависимости от источника расплавления металла различают газопламенную, дуговую, высокочастотную и плазменную металлизацию. При ремонте оборудования наибольшее распространение получила дуговая металлизация.

Небольшие объемы работ по металлизации выполняют переносными (ручными) дуговыми электрометаллизаторами ЭМ-3А; значительные по объему работы — станочными электрометаллизаторами ЭМ-6 и высокочастотными металлизаторами МВЧ-1, МВЧ-2. Покрытия на поверхностях ренодеталей из разнородных металлов получают с помощью многофазных металлизаторов УМА-1. Питание электрометаллизаторов осуществляется либо от трансформаторов специальной конструкции (СТЭ-43-2с), либо от обычных сварочных трансформаторов (без дросселей) с дополнительными отводами от витков вторичной обмотки, допускающими регулирование напряжения в пределах 20...55 В (с промежутками через 4...5 В) при токе не менее 250 А. При восстановлении поверхностей ренодеталей под неподвижные посадки применяют малоуглеродистую проволоку из стали 08, 10, 15, 20. Для получения износостойких покрытий на ренодеталях, работающих в подвижных соединениях, применяют проволоку из высокоуглеродистых сталей У7, У7А, У8, У10. В ручных электрометаллизаторах (ЭМ-3А) применяют высокоуглеродистую проволоку диаметром более 2,5 мм, предварительно отожженную при температуре 760 °С в электропечи. Образовавшаяся окалина на проволоке должна быть удалена пескоструйной обработкой. При нанесении слоя покрытия на поверхность детали ее нагрев до 50...70 °С не вызывает никаких структурных изменений в металле детали, т.е. его механические свойства сохраняются.

Применяется механизированное напыление покрытий проволокой из цинка, алюминия и других металлов, напыление вручную покрытий с проволокой из цинка, алюминия и других металлов, напыление с использованием проволоки (диаметр 1,5— 2 мм) из цинка, алюминия, стали, молибдена и других металлов в виде проволоки в целях защиты от коррозии, восстановления и упрочнения деталей машин и механизмов (рис. 4.54).

С помощью рассматриваемых способов осуществляют заделку трещин в ренодеталях из алюминиевых сплавов (сплавы: АД, АМц, АМг), наносят покрытия на любые материалы: металл, пластмассу, дерево, резину и т.п. Металлизация обеспечивает высокую твердость напыленного слоя, что

способствует увеличению сроков службы восстанавливаемых деталей. Напыляют самые разнообразные металлы. Например, для напыления может быть использована биметаллическая проволока из алюминия и свинца, что позволяет не только заменять дорогостоящие оловянистые баббиты и бронзы, но и значительно увеличить срок службы подшипников.

При подготовке поверхности ренодеталей к металлизации отдельные операции выполняют в следующей последовательности:

- очищают ренодетали от загрязнений, пленок, окислов, жировых пятен, влаги и продуктов коррозии в моечных машинах, щетками, промывают в бензине или растворителях, нагревают в печах пламенем газовой горелки или паяльной лампы;

- выполняют предварительную обработку резанием поверхности для придания ей правильной геометрической формы и доводят размеры детали до размеров, при которых возможно нанесение покрытий заданной толщины; на концах цилиндрических поверхностей оставляют буртики и протачивают замки в виде кольцевых канавок, предохраняющие покрытие от разрушения;

- получают на поверхностях восстанавливаемых деталей шероховатость, необходимую для удержания нанесенного слоя металла;

- обеспечивают защиту смежных поверхностей деталей, не подлежащих металлизации.

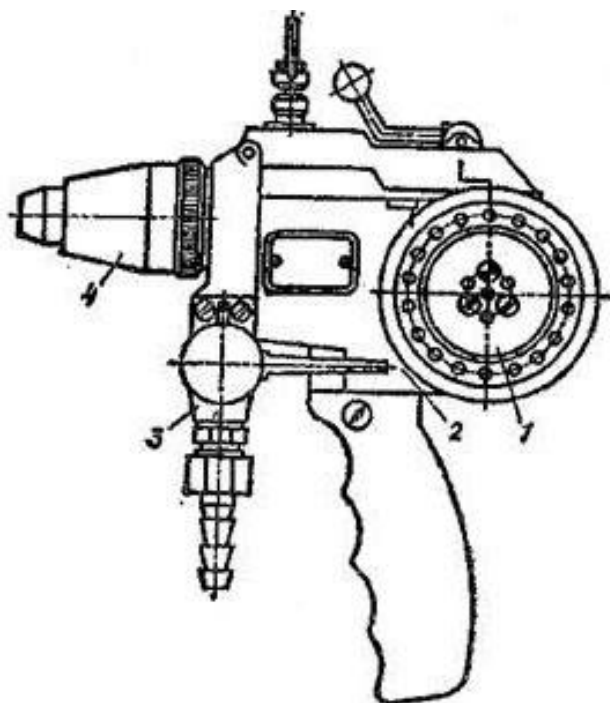


Рис. 4.54. Газовый металлизатор МГИ-4: 1— воздушная турбина; 2 — червячный редуктор; 3— пробковый кран; 4 — сопло.

**Газодинамическое нанесение покрытий.** Технология включает в себя нагрев сжатого газа (воздуха), подачу его в сверхзвуковое сопло и формирование в этом сопле сверхзвукового воздушного потока, подачу в этот поток

порошкового материала, ускорение этого материала в сопле сверхзвуковым потоком воздуха и направление его на поверхность обрабатываемого реноизделия. Принципиальная схема способа представлена на рис. 4.55.

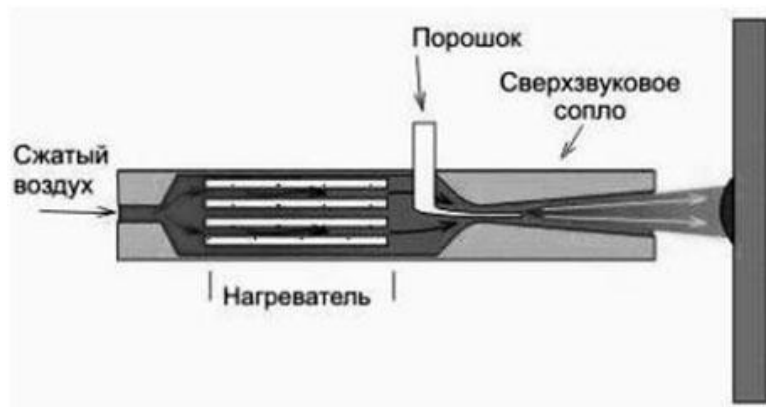


Рис. 4.55. Схема газодинамического нанесения покрытий

В качестве порошковых материалов используются порошки металлов, сплавов или их механические смеси в добавке с керамическими порошками. При этом путем изменения режимов работы оборудования можно либо проводить эрозионную обработку поверхности изделия, либо наносить металлические покрытия требуемых составов. Изменением режимов можно также менять пористость и толщину напыляемого покрытия. На рис. 4.56 показана структура напыляемого покрытия.

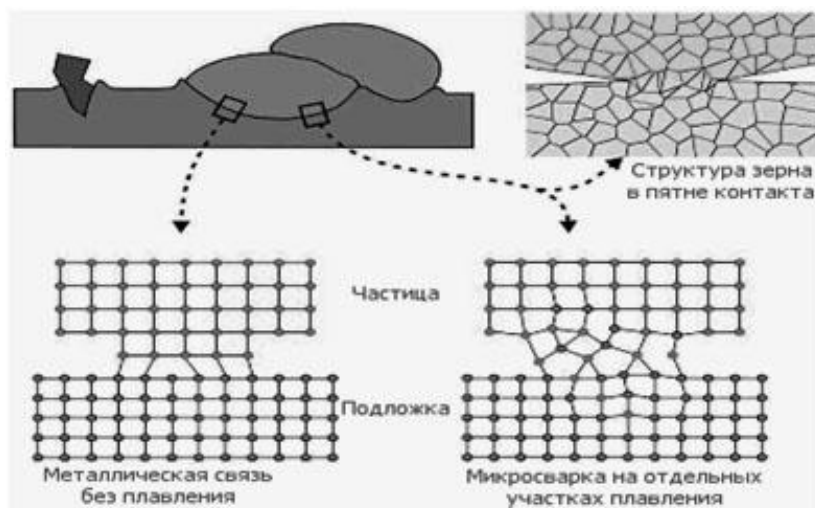


Рис. 4.56. Структура напыляемого покрытия

В наиболее распространенных газотермических методах нанесения покрытий для формирования покрытий из потока частиц необходимо, чтобы падающие на подложку частицы имели высокую температуру (обычно выше температуры плавления материала). В данном случае с твердой подложкой взаимодействуют частицы, находящиеся в нерасплавленном состоянии, но обладающие очень высокой скоростью. Ускорение частиц покрытия до нужных

скоростей осуществляется сверхзвуковым воздушным потоком с помощью специальных установок. Закрепление твердых металлических частиц, обладающих большой кинетической энергией, на поверхность положки происходит в процессе высокоскоростного удара.

### **3.5.4. Нанесение полимерных покрытий**

Пластмассы в ремонтно-восстановительном производстве наносят на поверхности ренодеталей для восстановления их размеров, повышения износостойкости и улучшения герметизации. При этом покрытие из пластмассы снижает шум от трения и повышает коррозионную стойкость реноизделия. Тонкий слой пластмассы практически не ухудшает прочностных показателей металла и придает восстанавливаемой детали податливость, т.е. способность принимать форму сопряженной детали, что приводит к резкому увеличению площади контакта. Пластмассы наносят литьем под давлением, горячим прессованием, вихревым, газопламенным и центробежным способами.

**Акриловые пластмассы.** При восстановлении реноизделий широко применяют акриловые пластмассы, содержащие в качестве связующих материалов акриловые смолы — продукты полимеризации метилметакрилата и сополимеризации метилметакрилата со стиролом. К ним относят: актилат АТС-1, бутакрил, эпоксидно-акриловые пластмассы СХЭ-2 и СХЭ-3. Эти термопластические быстротвердеющие пластмассы холодного отверждения получают смешиванием порошка и жидкости. Изготовленная масса, имеющая консистенцию сметаны, затвердевает без подогрева и давления. Затвердевшая пластмасса износостойка, хорошо работает в паре с чугуном, сталью, бронзой, коэффициент трения при отсутствии смазочного материала 0,20—0,18, а при введении в композицию требуемого количества антифрикционных добавок уменьшается до 0,143. Пластмассы с такими добавками могут работать без смазки. Вязкость пластмасс изменяют в зависимости от их назначения. Для этого в раствор пластмассы вводят порошкообразные, волокнистые и слоистые наполнители из металлических и неметаллических материалов. Затвердевшая пластмасса стойка к щелочам любой концентрации, бензину, скипидару, пресной и морской воде, минеральным и растительным маслам. Слой пластмассы можно удалить нагреванием до 150...200 °С и дальнейшим выжиганием или обработкой резанием.

Такие пластмассы используют при восстановлении изношенных реноизделий в качестве компенсатора износа для восстановления нарушенных размерных цепей станков и машин. С помощью пластмасс восстанавливают: круговые направляющие станин карусельных станков, направляющие кареток токарных, фрезерных, расточных, зубофрезерных и других станков;

регулируемые клинья и прижимные планки механизмов всех видов оборудования, в том числе механических прессов. Их также используют для ремонта подшипников шпинделей revolverных головок токарно-revolverных станков; отверстий под пиноль задней бабки; резьбы гаек ходовых винтов, втулок, посадочных мест зубчатых колес и шкивов; деталей гидронасосов; кулисных механизмов и других деталей металлорежущего оборудования.

Для повышения эксплуатационных свойств (уменьшения коэффициента трения и увеличения износостойкости) в пластмассу вводят (до 10 %, массовая доля) порошок графита. Однако при этом ухудшаются адгезионные свойства раствора пластмассы. Чтобы использовать хорошие адгезионные качества ненаполненной пластмассы и повышенные эксплуатационные свойства раствора, содержащего антифрикционные наполнители, направляющие крупных металлорежущих станков (со слоем пластмассы толщиной более 2 мм) ремонтируют двухступенчатым методом. Восстанавливаемая поверхность покрывается слоем раствора пластмасс СХЭ-2 и СХЭ-3 (подложка) без наполнителя, обладающей максимальной адгезией.

Качество подготовки поверхностей и выверка точности координат оказывают большое влияние на качество и трудоемкость восстановления реноизделия в целом.

Рассмотрим некоторые технологии восстановления деталей с применением пластмасс.

**Восстановление подшипников скольжения.** Если подшипник имеет незначительный равномерный износ, его поверхность можно восстановить простым смазыванием. Внутреннюю поверхность подшипника зачищают, тщательно обезжиривают и покрывают равномерным слоем эпоксидной композиции. После отверждения пластмассы можно дополнительно обрабатывать ее на токарно-винторезном станке.

Восстановление поверхностей подшипников скольжения выполняют с применением пластмасс, содержащих, массовые доли: эпоксидной смолы ЭД-6 100, порошка графита 30, полиэтиленполиамина 10. Для восстановления подшипников применяют и антифрикционный материал ЭТС-52, содержащий массовые доли: эпоксидной смолы 100, полиэтиленполиамина 10, тиксола ЛП-2 25, маршалита 80...100, дибутилфталата 10, графита СК.ЛН 50...80.

Пластмасса обладает хорошими антифрикционными свойствами, эластична и влагонепроницаема, не растворяется в бензине, керосине и маслах. Коэффициент трения в паре со сталью без смазочного материала 0,02. Пластмасса обладает высокой адгезией к металлу, что позволяет успешно применять эпокситиоколовые композиции для восстановления подшипников.

**Заделка забоин и задиров.** В результате длительной эксплуатации на установочных поверхностях столов оборудования появляются задиры и забоины. Для восстановления поверхности стола применяют метод заделки поврежденных мест с помощью накладок, устанавливаемых на эпоксидном клее. Накладки изготавливают из материала ренодетали. Высота накладки должна быть больше глубины паза на 1—2 мм. Сопрягаемые поверхности паза и накладки промывают растворителем и покрывают слоем клея. Установленную накладку прижимают грузом, создающим давление 0,8 МПа. После отверждения пластмассы накладку подгоняют заподлицо с установочной плоскостью стола.

Для устранения задиров на направляющих станины применяют эпоксидные замазки того же состава, что и для заделки трещин корпусных деталей. Замазкой можно также выравнивать имеющиеся вмятины, небольшие забоины, раковины, а также другие повреждения трущихся поверхностей.

**Устранение трещин и пробоев.** По концам трещины сверлят отверстия  $\varnothing 2,5 \dots 3$  мм. Снимают фаску вдоль трещин под углом  $60 \dots 70^\circ$  на глубину 1...3 мм. Зачищают поверхность на расстоянии 40...50 мм от трещины и дважды обезжиривают ее ацетоном с последующей просушкой в течение 8...10 мин. Наносят на поверхность эпоксидный состав при ремонте чугунных и стальных ренодеталей. Если длина трещины меньше 20 мм (рис. 4.57), то проводят отверждение композиций при комнатной температуре в течение 72 ч или при той же температуре 12 ч, а затем при нагревании в термошкафу по одному из режимов: при температуре  $40^\circ\text{C}$  в течение 48 ч, при  $60^\circ\text{C}$  - 24, при  $80^\circ\text{C}$  - 5, при  $100^\circ\text{C}$  - 3 ч.

Трещину длиной 20...150 мм заделывают так же, но после нанесения первого слоя эпоксидного состава на нее дополнительно накладывают стеклоткань с перекрытием трещины на 20...25 мм и прикатывают ее роликом. Затем вновь наносят слой эпоксидного состава, накладывают стеклоткань и прикатывают роликом. После этого вновь наносят эпоксидную композицию и отверждают, как описано ранее.

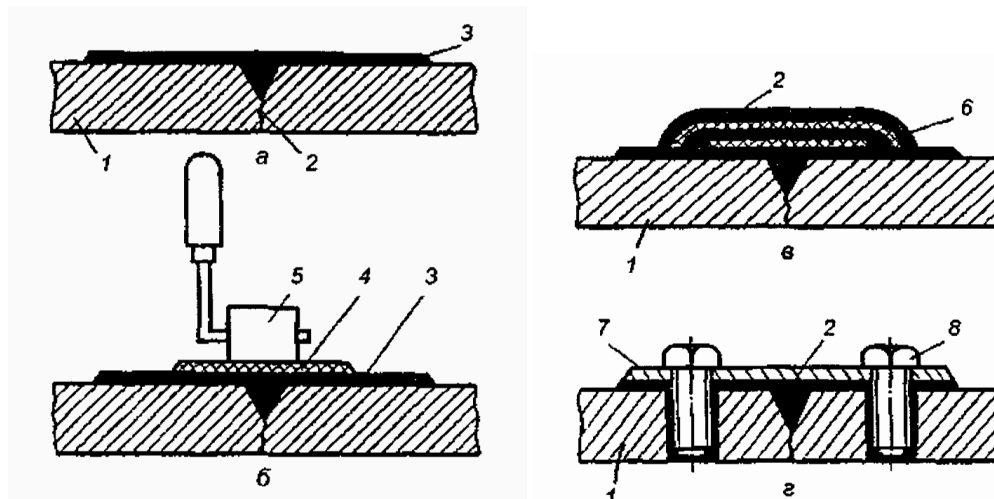


Рис. 4.57. Схемы заделки трещин: а-г – варианты; 1 – ренодеталь; 2 – трещина; 3 – эпоксидный состав 4,6 – накладки из стеклоткани; 5 – ролик; 7 – металлическая накладка; 8- болт.

Трещину длиной более 150 мм разделявают и подготавливают, как было описано ранее. Изготавливают стальную накладку толщиной 1,5...2 мм с перекрытием трещины на 40...50 мм, сверлят в ней отверстия  $\varnothing$  10 мм на расстоянии 50...70 мм друг от друга. По этим отверстиям накернивают и сверлят отверстия в ремонтируемой ренодетали, нарезают в них резьбу М8. Затем наносят на ренодеталь и пластину эпоксидный состав, закрепляют накладку винтами и отверждают.

Пробоины на ренодеталях заделывают так же, как трещины длиной более 150 мм с помощью постановки на эпоксидный состав и винты стальных накладок.

**Восстановление неподвижных подшипниковых соединений.** Для этого применяют эпоксидные композиции, эластомеры и анаэробные герметики. Поверхности из любого материала зачищают до блеска, дважды обезжиривают ацетоном с последующей просушкой в течение 10 мин.

**Ремонт и стопорение резьбовых соединений.** Сильно изношенные резьбовые отверстия в корпусных ренодеталях часто восстанавливают установкой ввертышей. В этом случае ввертыши удобно закреплять нанесением на поверхности отверстий и ввертыша эпоксидного состава. При небольших износах соединения его восстанавливают путем нанесения эпоксидного состава на подготовленные отверстия и шпильку (болт). Зазор резьбового соединения до 0,3 мм можно восстановить нанесением на подготовленные поверхности анаэробного герметика. Во всех случаях необходимо соблюдать условия подготовки поверхностей и режим отверждения полимера.

**Восстановление гильз рабочих цилиндров.** Основной частью гидравлических и пневматических приводов оборудования является цилиндр.

Стальные гильзы рабочих цилиндров находятся в длительной эксплуатации и поэтому сильно изнашиваются. Для восстановления первоначальных размеров трущихся поверхностей применяют пластмассы. Изношенную гильзу растачивают для удаления следов износа и промывают растворителем. Одну из сторон гильзы закрывают крышкой, заливают в цилиндр жидкую пластмассу и затем закрывают цилиндр второй крышкой.

### **3.5.5. Нанесение гальванических покрытий**

Для восстановления ренодеталей и их размеров наиболее распространены следующие способы нанесения гальванических покрытий: электролитическое хромирование, электролитическое железнение, химическое никелирование, электроконтактное цинкование.

*Электролитическое хромирование.* Хромирование подразделяют на: коррозионно-стойкое, износоустойчивое, пористое декоративное.

Различают три группы ренодеталей, наращиваемых хромом, отличающихся условиями эксплуатации и режимами осаждения, придающими различные свойства эксплуатируемым покрытиям.

*Первую* группу составляют ренодетали, наращиваемые хромом с целью восстановить размеры и создать переходные посадки и посадки с натягом.

*Вторая* условная группа состоит из ренодеталей, работающих на трение при малых и средних давлениях и окружных скоростях, при постоянной или переменной загрузке. К таким деталям относятся валы, плунжеры, цилиндры, поршни, мерительный инструмент и многие другие.

К деталям *третьей* группы могут быть отнесены ренодетали, работающие при больших давлениях и значительных знакопеременных нагрузках, для которых необходимы максимальная прочность связи слоя хрома с поверхностью ренодеталей и вязкость осадков хрома.

Покрытия электролитическим хромом получают при осаждении хрома из водных растворов в результате прохождения через раствор электрического тока. Качество хромового покрытия в основном зависит от состава электролита, плотности тока, температуры электролита и интенсивности его перемешивания в ванне. Изменяя указанные элементы технологического процесса и время осаждения, получают покрытия разной толщины с различными физико-механическими свойствами и равномерностью. Основными составляющими электролитов являются хромовый ангидрид и серная кислота.

Хромирование крупногабаритных ренодеталей (или их отдельных мест) в стационарных ваннах не всегда целесообразно. Поэтому для таких ренодеталей используют переносные ванны, в которые ренодеталь не погружают, а пристраивают ванну к ренодетали. Этот способ осаждения хрома особенно

эффективен в том случае, когда хром наносят на поверхности внутренних полостей, которые могут служить емкостями для электролита. Питание постоянным током переносных ванн осуществляется от передвижного низковольтного генератора или выпрямителя тока.

При наращивании гильз и цилиндров применяют подвески. Поршневые кольца и червяки червячных передач хромируют, используя специальные приспособления. Для лучшего удержания смазки на ренодеталях применяют пористое хромирование, так как плотный беспористый хром плохо смачивается маслами. Применение специальных пористых хромовых покрытий улучшает смачиваемость поверхностей самой детали примерно в 3...5 раз, а сопряженной с ней детали в 1,5...2 раза. Степень пористости хромового покрытия в значительной мере зависит от температуры электролита и плотности тока. При увеличении температуры пористость уменьшается и сетка каналов становится более редкой. Последующая после хромирования электрохимическая обработка (анодное травление) окончательно формирует сетку каналов. Скорость этого формирования зависит от интенсивности процесса травления, т.е. от плотности тока. Плотность тока при анодном травлении должна составлять 40...60 А/дм<sup>2</sup>, время выдержки 5...12 мин. Анодное травление осуществляют в растворе для хромирования.

Обработку резанием можно выполнять перед анодным травлением или после него. На шлифованной поверхности получают более равномерную сетку и одинаковую ширину каналов. Выбор типа хромового покрытия зависит от условий эксплуатации деталей. Так, например, покрытие с пористостью в виде частой сетки целесообразно применять для поршневых колец цилиндров. Такая пористость лучше способствует притирке колец к поверхности цилиндров. Однако поверхность цилиндров лучше работает при применении хромированных поршневых колец с редкой сеткой каналов. При электроосаждении периодическое изменение направления постоянного тока существенно изменяет некоторые свойства покрытий. Одна из характерных особенностей хромирования с применением реверсирования тока — возможность получения покрытия толщиной 300 мкм и более с малыми внутренними напряжениями.

Хромирование проводят при следующем режиме: температура электролита 50...60°C, катодная плотность тока 60...120 А/дм<sup>2</sup>, длительность катодного периода 1...5 мин, длительность анодного периода 5...25 с. При периодических изменениях направления тока применяется электролит, содержащий 200...250 г/л хромового ангидрида CrO<sub>3</sub> и 2...2,5 г/л серной кислоты Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, или саморегулирующийся электролит. Реверсирование позволяет ускорить процесс осаждения хрома в 1,5...2 раза по сравнению с обычными режимами.

Качественные и количественные изменения в процессе хромирования возможны из-за применения тока высокой плотности, при котором выход хрома возрастает. С увеличением скорости протекания электролита от 0 до 200 см/с микротвердость осажденного металла повышается от 7000 до 10 000 МПа при ведении процесса с плотностью тока 45 А/дм<sup>2</sup> и температуре электролита 45 °С.

Многослойные электролитические покрытия получают, последовательно наращивая на детали разные металлические покрытия в различном сочетании. К типу многослойных покрытий может быть отнесено и так называемое двухслойное хромовое покрытие. Последнее получают при нанесении различных осадков хрома с изменяющимися свойствами. Если необходимо защитить деталь от коррозии при одновременном увеличении ее износостойкости, наносят два слоя хрома: нижний — беспористый молочный и верхний — блестящий. Слой молочного хрома толщиной 15 мкм осаждают при температуре 70 °С и плотности тока 30 А/дм<sup>2</sup>. Температура электролита 50°С, плотность тока 50 А/дм<sup>2</sup>. Хромирование производят в двух ваннах с электролитами одинакового состава (250 г/л хромового ангидрида и 2,5 г/л серной кислоты).

При изготовлении деталей с хромовым покрытием и износе поверхностей трущихся деталей возможны повреждения защитного слоя.

**Электролитическое железнение.** При железнении, как и при других электролитических процессах, состав и свойства осажденного металла зависят от состава электролита и режимов наращивания. Процесс покрытия электролитическим железом осуществляют с использованием растворимых (стальных) и нерастворимых (угольных) электродов. При восстановлении изношенных деталей железнением иногда возникает необходимость снятия неполноценного слоя электролитического железа. Для этой цели применяют специальные растворы. Затем деталь подвергают анодной обработке в 30 %-ном растворе серной кислоты. Электролит для железнения необходимо выбирать с учетом возможности подбора соответствующих материалов для изготовления ванн. Перед помещением в ванну ренодеталей, подвергающихся железнению в горячих электролитах, необходимо производить кратковременный их прогрев (до температуры электролиза) в течение 3....5 мин до включения тока.

**Химическое никелирование.** Химическое никелирование используют при наращивании равномерных по толщине покрытий на ренодеталях из стали, меди, латуни, никеля и алюминия. Получение покрытий при химическом никелировании основано на восстановлении гипофосфитом ионов никеля из водных растворов солей этого металла. В результате реакции на поверхности наращиваемых деталей осаждается покрытие, состоящее из никеля и фосфора. Содержание фосфора в никелевых покрытиях зависит от режима технологического процесса и колеблется от 5 до 13 %, при этом в поверхностном

слое микротвердость 3500...5000 МПа, которая растет с увеличением содержания фосфора в осадке. Термическая обработка улучшает также прочность сцепления поверхности наращиваемой детали с покрытием, которая после осаждения равна примерно 35 МПа, а после нагрева до 200...250 °С в течение 40...60 мин 280 МПа.

Наращивание химического никеля осуществляется как в щелочных, так и в кислых растворах. Щелочные растворы характеризуются лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с кислыми. Скорость наращивания покрытия при химическом никелировании в этих растворах может быть постоянной и поддерживаться на уровне 10...12 мкм/ч никеля, гипофосфита и раствора аммиака в соответствии с заданной рецептурой. Необходимо поддерживать величину рН в пределах 8,5...8,7.

**Электроконтактное цинкование** (натирание) применяют для восстановления посадочных мест под подшипники с небольшим износом, например, проушины вилок карданных валов. Цинкование проводят в электролите, содержащем, г/л: сернокислого цинка 280...300, борной кислоты 20...40. Процесс начинают вести при плотности тока 30...50 А/дм<sup>2</sup>. Скорость перемещения анодного тампона относительно покрываемой поверхности 10 м/мин. Обычно используют размерное цинкование, т.е. покрытые поверхности не обрабатывают резанием. При цинковании с применением периодического тока свойства покрытий улучшаются, а процесс интенсифицируется в 2...3 раза.

### **3.5.6. Заливка жидким металлом**

При восстановлении сильно изношенных деталей или при заделке крупных местных дефектов в отливках используют заливку жидким металлом. Для получения прочной связи заливаемого металла с металлом восстанавливаемой ренодетали поверхность детали подвергают специальной обработке. Присадочный материал расплавляют отдельно в плавильных печах и заливают из тигля с помощью специального разливочного устройства. Получение заливкой поверхностного слоя, соответствующего по составу металлу ренодетали, обеспечивают подбором шихты соответствующего состава. При нагреве восстанавливаемой поверхности ренодетали за счет теплоты жидкого металла (т.е. без предварительного подогрева детали) последний выливают на восстанавливаемую поверхность.

Предварительное оплавление перед заливкой поверхностного слоя восстанавливаемой детали экономически более выгодный процесс, вследствие сокращения продолжительности восстановления и расхода жидкого металла. Изношенные детали можно заливать различными металлами и сплавами. Для восстановления крупных партий дефектных деталей используют плавильную

печь и специальный металлосборник с разливочными приспособлениями. Заливкой жидким металлом целесообразно восстанавливать крупногабаритные изделия или значительное количество мелких однотипных деталей. Этот способ обеспечивает высокую производительность и качество.

Втулки, подшипники скольжения, сменные венцы зубчатых колес и цилиндры восстанавливают центробежной наплавкой жидким металлом. Центробежным способом заливают полые заготовки из цветных и железоуглеродистых сплавов, имеющих относительно низкую температуру плавления. Такой процесс возможен при условии, что температура плавления металла восстанавливаемой детали выше, чем у наплавляемого материала.

### 3.5.7. Восстановление деталей пластическим деформированием

Этот способ основан на способности ренодеталей изменять форму и размер без разрушения путем перераспределения металла под давлением. В этом случае объем ренодетали остается постоянным, а металл от нерабочих поверхностей перемещается на изношенные рабочие поверхности. Ренодетали деформируют как в холодном, так и нагретом состоянии. Стальные ренодетали твердостью до *HRC 30*, а также ренодетали из цветных металлов и сплавов обычно деформируют в холодном состоянии без предварительной термообработки.

Применяют следующие виды пластического деформирования ренодеталей: осадку, вдавливание, раздачу, обжатие, вытяжку, правку, электромеханическую обработку и др. (рис. 4.58).

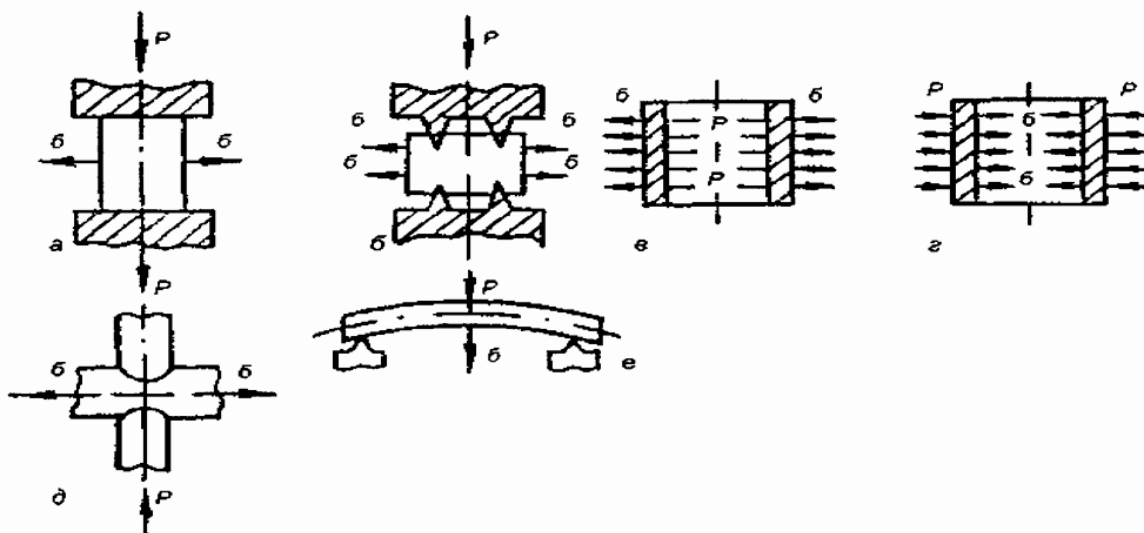


Рис. 4.58. Виды пластического деформирования: *а* – осадка; *б* – вдавливание; *в* – раздача; *г* – обжатие; *д* – вытяжка; *е* – правка

*Осадку* применяют для увеличения наружного диаметра сплошных и

полых ренодеталей, а так же уменьшения внутреннего диаметра полых ренодеталей за счет уменьшения их высоты (бронзовые втулки и др.). Допускается уменьшение высоты втулок на 8-10%.

*Вдавливание* отличается от осадки тем, что высота ренодетали не изменяется, а увеличение ее диаметра происходит за счет выдавливания металла из нерабочей части. Вдавливанием восстанавливают тарелки клапанов двигателей, боковые поверхности шлицев на валах и др.

*Раздачу* применяют для восстановления пустотелых ренодеталей с изношенной наружной поверхностью (втулок, поршневых пальцев и др.). При механической раздаче через отверстие ренодетали продавливают шарик или специальный пуансон (оправку). При этом возможно укорочение ренодетали и появление в ней трещин.

В последние годы применяют термопластическую раздачу поршневых пальцев, сущность которой состоит в том, что пальцы нагревают в индукторе ТВЧ до  $780...830^{\circ}\text{C}$  в течение 20...25 с и охлаждают водой, пропускаемой через отверстие пальца под давлением 0,4...0,5 МПа в течение 14..16 с. При этом происходит увеличение наружного диаметра пальца до 0,25 мм с одновременной закалкой его поверхностного слоя. После раздачи пальцы подвергают механической обработке, контролю и сортировке.

*Обжатие* применяют для восстановления ренодеталей с изношенными внутренними поверхностями, уменьшение наружных размеров которых не имеет значения (корпуса насосов гидросистем, проушины рычагов, вилок и др.).

*Вытяжку* применяют для увеличения длины ренодеталей за счет уменьшения их поперечного сечения (тяги, штанги и т.д.). Деформируют ренодетали в горячем состоянии.

*Правку* применяют для ремонта ренодеталей, в которых во время работы возникли остаточные деформации (изгиб, скручивание) или коробление (валы, оси, рычаги, рамы и др.). Прикладываемое при правке усилие должно обеспечить деформацию, в 10...15 раз превышающую устраняемый изгиб ренодетали. Нагрузку прикладывают несколько раз в течение 1,5...2 мин. Для повышения усталостной прочности и стабильности геометрической формы ренодетали после холодной правки подвергают нагреву до  $400...500^{\circ}\text{C}$  и выдерживают 0,5...1 ч. Закаленные ТВЧ ренодетали нагревают до  $180...200^{\circ}\text{C}$  и выдерживают 5...6 ч.

При правке статическим изгибом на прессе снижаются усталостная прочность и пластичность вала. Поэтому для правки ответственных ренодеталей (например, коленчатых валов) рекомендуется применять более прогрессивный способ наклепа (рис. 4.59). В этом случае наклеп галтелей вала выполняют клепальным пневматическим молотком КМП-14М или ручным слесарным

молотком массой 0,8 кг со специальными бойками, размеры которых должны соответствовать размерам галтелей. Прямолинейность вала восстанавливается за счет возникающих в поверхностном слое металл внутренних напряжений сжатия.

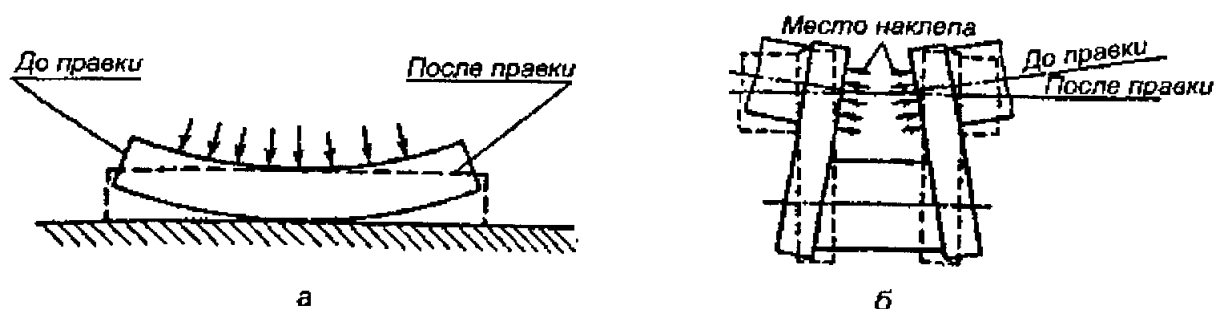


Рис. 4.59. Схема правки наклепом: а – бруса; б – коленчатого вала

**Электромеханическая обработка** заключается в следующем. Ренодеталь закрепляют в шпиндель токарного станка. В резцедержателе суппорта закрепляют специальную оправку с рабочим инструментом. Ренодеталь и инструмент подключают к вторичной обмотке понижающего трансформатора. Включают вращение ренодетали, прижимают к ней с определенным усилием инструмент и включают его продольную подачу. При этом через зону контакта ренодетали и инструмента протекает ток 350...700 А при напряжении 1...6 В, так как площадь контакта ренодетали и инструмента очень мала, а сила тока большая, то металл ренодетали в зоне контакта мгновенно нагревается до температуры 800...900<sup>0</sup>С и легко деформируется инструментом. Последующий быстрый отвод теплоты внутрь ренодетали (охлаждение) способствует закалке поверхностного слоя.

В качестве инструмента используют пластинку или ролик из твердого сплава. При восстановлении ренодетали (рис. 4.60) изношенную поверхность сначала высаживают заостренной пластиной или роликом. При этом нагретый в зоне контакта металл выдавливается, образуя выступы, аналогичные резьбе, в результате чего диаметр ренодетали увеличивается от  $d_H$  до  $d_B$ . Затем высаженную поверхность обрабатывают сглаживающей пластиной или роликом до номинального диаметра  $d_H$ .

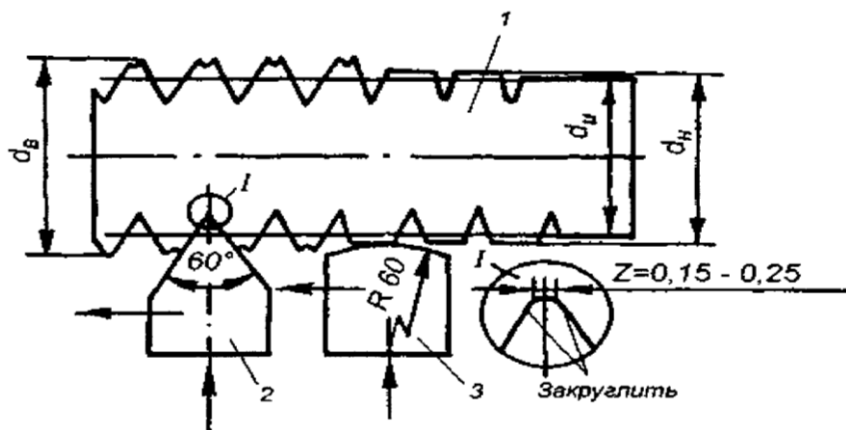


Рис. 4.60. Схема восстановления ренодеталей электромеханическим способом: 1 – ренодеталь; 2 – высаживающий инструмент; 3 – сглаживающий инструмент;  $d_u$  – диаметр изношенной ренодетали;  $d_B$  – диаметр детали после высадки;  $d_n$  – номинальный диаметр ренодетали

Восстановленная поверхность получается прерывистой, площадь ее контакта с сопрягаемой ренодеталью меньше номинальной. Допускается уменьшение площади контакта не более чем на 20% по сравнению с номинальной. Для этого нужно, чтобы  $d_B - d_n \geq 3(d_n - d_u)$ . Увеличение диаметра незакаленных ренодеталей возможно на 0,4, а закаленных – на 0,2 мм. Для большего увеличения диаметра при сохранении необходимой площади контакта применяют заполнение образовавшейся винтовой канавки проволокой или составами на основе эпоксидных смол.

#### Контрольные вопросы к главе 4.

1. Какие задачи решают конструктор и технолог при обеспечении надежности изделия?
2. Какими технологическими методами можно повысить износостойкость деталей машин?
3. Как от метода и режима обработки зависит усталостная прочность?
4. Каким образом лезвийная и абразивная обработки влияет на шероховатость, волнистость поверхности детали?
5. Как тепловой эффект при механической обработке влияет на микротвердость, остаточные напряжения поверхностного слоя?
6. Как применение СОТС влияет на параметры поверхностного слоя?
7. Что такое деформационное упрочнение поверхностного слоя? Как деформационное упрочнение зависит от условий обработки?
8. Что такое ППД и каковы ее разновидности?

9. Каким образом величина, знак и закономерность распределения напряжений зависят от свойств обрабатываемого материала, методов и режимов обработки?
10. Для чего применяется искусственное старение?
11. Перечислите основные способы восстановления ренодеталей.
12. Какие способы восстановления являются лидирующими в процессах ремонта деталей?
13. В чем сущность наплавки?
14. В чем сущность процесса напыления?
15. Перечислите основные способы пластического деформирования.
16. Какие современные способы нанесения покрытий применяются для восстановления поверхностей детали?
17. Чем отличаются статическое и динамическое ППД?
18. Какими физическими процессами сопровождается обработка ППД?
19. Чем характеризуется деформационное упрочнение?
20. Приведите классификацию методов пластического деформирования.
21. Какие методы нанесения покрытий используются в реновационных процессах?
22. Каково назначения и механизм процесса нанесения гальванического покрытия?
23. Охарактеризуйте основные методы пластического деформирования, применяемые для восстановления деталей.

## **Глава 5. Прогнозирование эксплуатационных свойств деталей машин и пути автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства**

### **5.1 Основные подходы к аналитической оценке и прогнозированию эксплуатационных свойств деталей машин**

Широкое использование в технологии изготовления деталей машин различных по физико-химической сущности методов обработки обусловило появление ряда теоретических подходов к описанию механизмов формирования поверхностного слоя, методов критериальной оценки их эффективности влияния на эксплуатационные свойства деталей, а также функциональных зависимостей показателей качества поверхностного слоя от режимов обработки. Трудности прогнозирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей, связаны не только со сложностью процессов происходящих в неоднородном, несплошном, дефектном и анизотропном материале, каковым является деформируемый поверхностный слой, но также с отсутствием единых

взглядов на природу прочности формируемых в процессе обработки поверхностных слоёв и общепринятой теоретической базы, удовлетворительно объясняющей механизм процессов протекающих в зоне силового контакта. Подтверждением этого заключения является применение для оценки технологического обеспечения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей различных научных подходов и полученных на их основе аналитических моделей. На данный момент такие модели в большей степени носят эмпирический характер.

При разработке аналитических моделей прогнозирования эффективности технологических методов, как правило, рассматривается два этапа: первый связан с разработкой физической модели процесса, второй с её расчётной аналогией. На протяжении развития науки о методах обработки было предложено три основополагающих подхода к анализу механизма и явлений формирования поверхностного слоя различных по структуре материалов: феноменологический, механический и металлофизический.

В последние десятилетия в связи с появлением новых технологий получили дальнейшее развитие научные представления о механизме формирования поверхностного слоя и его влиянии на эксплуатационные свойства деталей. Появились модели оптимизации и управления процессом обработки.

Существующие расчетные модели по оценке показателей качества поверхности и прогнозированию эксплуатационных свойств можно условно разделить на два типа - эмпирические и полуэмпирические. Эмпирические модели представляют собой простейшую математическую аппроксимацию экспериментальных результатов. В них физико-механические характеристики связываются с технологическими характеристиками процесса обработки через безразмерные эмпирические коэффициенты, не имеющие четкого физического смысла. Зависимость имеет, как правило, вид линейной или степенной функции.

Полуэмпирические модели включают параметры, для каждого из которых установлена связь с физико-механическими свойствами материалов, характеристиками процессов и т. д. Экспериментальная оценка этих параметров позволяет производить анализ реальных физических явлений. Расчетные зависимости в полуэмпирических моделях строятся из физических соображений с учетом размерностей параметров.

**Феноменологический подход.** В феноменологическом подходе все технологические процессы рассматриваются как протекающие в закрытом «черном ящике». При этом все температурные, силовые, геометрические и др. характеристики процесса контактного взаимодействия неизвестны, анализу подлежат лишь начальные механические свойства поверхностных слоев

(входные параметры) и проявленная ими стойкость к условиям внешнего физико-механо-химического воздействия на них (выходные параметры), соотношение между которыми устанавливается эмпирически при лабораторных испытаниях.

Привлекательность феноменологического подхода для описания процесса повреждаемости и разрушения поверхностного слоя при эксплуатации связана с достаточной простотой получения механических характеристик и возможностью описания эксплуатационных свойств  $\varepsilon$  при помощи несложных эмпирических зависимостей вида

$$\varepsilon = f(M, a_i), i=1 \dots n, (1.1) \quad (5.1)$$

где  $M$  – механическая характеристика,  $a_i$  – эмпирические коэффициенты,

При этом обработка связана с достаточной простотой получения механических характеристик и возможностью описания эффекта обработки при помощи несложных эмпирических зависимостей.

Первые эмпирические расчетные модели по оценке показателей качества поверхности и эксплуатационных свойств опирались на идею об аналогии показателей качества поверхности и эксплуатационных свойств с механической прочностью материалов. Так, например, применяя этот подход, М.М. Хрущев и М.А. Бабичев установили [255], что для технически чистых металлов и сталей в отожженном состоянии относительная износостойкость при абразивном изнашивании прямо пропорциональна микротвердости  $H_\mu$ , и предложили следующее уравнение для оценки износостойкости  $\varepsilon$  материалов:

$$\varepsilon = b \cdot H_\mu, \quad (5.2)$$

где  $b$  – коэффициент пропорциональности, общий для всех указанных металлов и сталей.

Для сталей в состоянии после закалки и отпуска на различную твердость относительная износостойкость имеет также линейную зависимость от микротвердости:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b' (H_\mu - H_0), \quad (5.3)$$

где  $\varepsilon_0$  и  $H_0$  – соответственно относительная износостойкость и микротвердость данной стали в отожженном состоянии;  $b'$  – коэффициент пропорциональности.

Этот подход не имеет эвристической ценности, так как многие процессы, протекающие на микро- и мезоуровнях, оказываются при этом завуалированы эмпирическими коэффициентами, для которых не был определен четкий физический смысл. Кроме того при использовании данных моделей не принимается во внимание пластичность материалов, которая как показывают исследования при сопоставлении например износостойкости металлов и минералов, имеющих одинаковую величину твердости, но разную пластичность, приводит к разнице в результатах почти на порядок (износостойкость металлов

выше в 11,4 раза). Вместе с тем эмпирические модели из-за простоты полученных формул до сих пор предлагаются к использованию при разработке современных методов расчетного прогнозирования эксплуатационных свойств материалов технологическими методами.

**Механический подход.** Механический подход к моделированию процессов обработки материалов привел к созданию полуэмпирических выражений, которые на протяжении последней четверти века составляют основную расчетную базу для проведения оценок эффективности технологического обеспечения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей. Это связано, во-первых, с достаточной простотой использования полученных зависимостей и, во-вторых, с возможностью качественного и количественного анализа технологических процессов обработки.

В механическом подходе поверхностный слой рассматривается как сплошное деформируемое твердое тело, отвечающее за диссипацию механической энергии упруго-пластической деформации, материал которого обладает структурными особенностями и физико-химическим состоянием, отличающими его от материала, локализованного в объеме, что выражается разными значениями их механических характеристик. Логика построения полуэмпирических расчетных моделей по определению показателей качества поверхностного слоя формируемого технологическими методами и характеристик эксплуатационных свойств деталей основана на какой-либо теории или гипотезе пластической деформации и разрушения, в которых учитываются параметры процесса деформирования, обусловленные конкретными условиями эксплуатации детали и механики контактного взаимодействия.

Рассмотрим, в качестве примера, ряд расчетных моделей по оценке технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин, разработанных на основе механического подхода.

Для расчета интенсивности усталостного изнашивания И.В. Крагельским разработана расчетная модель, отражающая феноменологическое описание микрокартины разрушения поверхностного слоя:

$$J = \frac{h^*}{(v+1)nd} \cdot \frac{A_{\phi}}{A_k}, \quad (5.4)$$

где  $h^*$  – максимальное абсолютное внедрение микронеровностей твердого тела;  $v$  – параметр кривой опорной поверхности;  $n$  – число циклов до разрушения;  $d$  – диаметр пятна касания;  $A_{\phi}$  – площадь фактического контакта;  $A_k$  – контурная площадь поверхности контакта.

В данной модели количество изношенного материала ставится в зависимость от объема, вытесненного из поверхности материала при внедрении

в нее твердых выступов контртела. Сложность практического применения данной модели объясняется тем, что определение значений  $A\phi$ ,  $h^*$  и подстановка их в выражение дает громоздкие и малопригодные для инженерных расчетов выражения, хотя и позволяет качественно определить влияние различных параметров на интенсивность изнашивания материалов.

Рассматривая механизм формирования поверхностного слоя в процессе ППД с позиций механики сплошных сред В.М. Смелянский и В.А. Блюменштейн считают, что для решения практических задач нет необходимости рассматривать физико-химические изменения в металле и предлагают величину упрочнения металла поверхностного слоя определять путем выявления области пластического течения, и устанавливают в этой области траектории движения частиц металла за весь цикл деформации сдвига  $\Gamma$ . При этом использовать не кривую  $\sigma(\epsilon)$  растяжения-сжатия, а кривую предельной пластичности  $\Gamma_p(\Pi)$  (рис. 5.1) полученной на основе гипотезы «единой кривой».

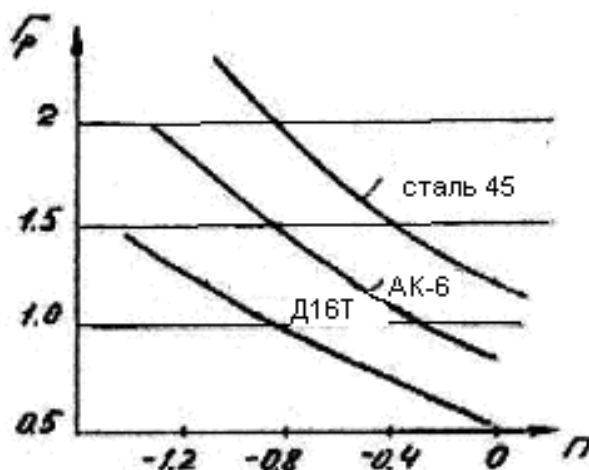


Рис. 5.1. Кривые предельной пластичности

Накопленная таким образом деформация является основным показателем, определяющим упрочнение металла, которая определяет степень истощения ресурса пластичности  $\psi$  и остаточных напряжений  $\sigma^0$ . При таком подходе критерием эффективности упрочнения является степень истощения ресурса пластичности  $\psi$ .

$$\psi = \int_0^{\Gamma} \frac{d\Gamma}{\Gamma_p(\Pi)} \quad \Pi = \frac{\sigma}{T} \quad T = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \quad (5.5)$$

где  $\Pi$  - показатель напряженного состояния;  $\sigma$  - гидростатическое давление.

$$\sigma^0 = \sigma_{nl} + \sigma_y, \quad (5.6)$$

где  $\sigma_{nl}$  - напряжения при пластической деформации;  $\sigma_y$  - упругие напряжения, которые могли бы возникнуть под действием внешней нагрузки противоположного знака.

Расчет накопленной деформации проводится суммированием элементарных приращений деформации, которые определяются путем измерения разности параметров соседних ячеек координатной сетки.

$$\Gamma = \sum_{i=1}^n \Delta \Gamma_i \quad (5.7)$$

Такая методика расчета ресурса пластичности  $\psi$ , учитывает эффект залечивания дефектов металла при перемене знака деформации, и предполагает, что критерий разрушения имеет вид:

$$\psi_p = \sum_{i=1}^L \psi_i - \sum_{i=1}^{L-1} \psi_i \left( \frac{1 - \psi_i^{a-1}}{1 - \psi_i^a} \right) = 1 \quad (5.8)$$

где  $L$  - число этапов деформирования (для обкатывания и выглаживания  $L=3$ );  $a$  - коэффициент, учитывающий способность металла к залечиванию образовавшихся в процессе деформации дефектов при перемене знака деформации (величина, обратная коэффициенту Менсона-Коффина).

Исследователями установлено, что визуально шелушение поверхности наблюдается, если, до очередного контакта обрабатывающего тела с поверхностью в металле накопится  $\psi_{вн} \approx 0,4 \div 0,5$ .

Авторы этой теории на основе использования ресурса пластичности в качестве критерия эффективности упрочнения разработали методику расчета технологических режимов в зависимости от физико-механических характеристик упрочненного слоя при ППД квазистатическими методами (обкатывание, выглаживание) и оценки долговечности детали.

Для комплексной оценки влияния физико-механических показателей качества поверхностного слоя упрочненного динамическими методами ППД на усталостную прочность деталей В.А.Лебедевым, на основе анализа расположения эпюр изменения по сечению механических свойств, остаточных и рабочих напряжений (Рис. 5.2), разработана следующая расчётно-аналитическая модель

$$k_v = \frac{\sigma_{-1}^{ynp}}{\sigma_{-1}^{ucx}} = \frac{k_a k_\mu}{1 - \frac{2h_n \chi}{s}} \quad (5.9)$$

где  $\sigma_{-1}^{ynp}$ ,  $\sigma_{-1}^{ucx}$  - предел выносливости упрочнённых и исходных образцов;  $k_a$  - коэффициент, характеризующий отношение предельной амплитуды напряжений при асимметричном цикле к пределу усталости при изгибе;  $k_\mu$  - коэффициент

Данная расчётно–аналитическая модель позволяет на стадии проектирования операции ППД комплексно оценить влияние физико–механических характеристик поверхностного слоя, формируемых в процессе упрочнения на повышение усталостной прочности деталей, и таким образом, оценить приемлемость метода ППД для упрочнения детали. Для определения параметров уравнения, в частности глубины и величины прироста микротвердости, а также значений остаточных напряжений (для расчета коэффициента предельных амплитуд напряжений), необходимо в арсенале технолога иметь расчетные зависимости, устанавливающие связь физико–

механических характеристик поверхностного слоя от технологических параметров процесса упрочнения, и которые в обобщенном виде могли бы быть применены к группе методов ППД, в основе которых лежит единый механизм формирования поверхностного слоя.

В работах Э.В.Рыжова, А.Г.Суслова[10,11], на основе механического подхода приводится комплекс эмпирических моделей по оценке влияния различных технологических методов обработки на эксплуатационные свойства деталей машин, таких как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость.

Несмотря на проблемы, связанные с расчётом в инженерной практике, эти модели до сих пор представляют интерес для многих исследователей, непрерывно развиваются новые методы оценок параметров этих моделей.

**Металлофизический подход.** Металлофизический подход в основном используется многими исследователями для установления и анализа структурно-фазовых явлений, протекающих в поверхностном слое и обеспечивающих его эффективную эксплуатацию. С физической точки зрения, поверхностные слои деталей представляют конденсированную среду, состоящую из соединенных между собой различными связями (ковалентными, ионными, металлическими и др.) атомов и молекул. Применительно к описанию процесса пластической деформации и разрушения металлов при эксплуатации знания из данной области помогают установить на микроуровне свойства различных дефектов, природу их образования и миграции, возможность накопления и аннигиляции, характерные масштабы и т. д.

Металлографический и рентгеноструктурный анализы материалов, подвергаемых внешним силовым воздействиям в различных условиях эксплуатации показали, что процесс эксплуатации деталей сопровождается существенными изменениями структуры и свойств тонких поверхностных слоев на микроуровне. В результате проведенных в этом направлении исследований исследователями выявлены доминирующие для различных условий эксплуатации виды дефектов и диссипативные дислокационные субструктуры, самоорганизующиеся при эксплуатации на определенной глубине поверхностного слоя. При этом одно из лидирующих положений приобрела дислокационная теория усталостного разрушения материалов. Объективность дислокационной теории обусловлена тем, что в процессе повреждаемости происходит постепенный рост плотности дислокаций, максимальное значение которой в материале наблюдается непосредственно перед разрушением (до  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ). Разрушение материала поверхностного слоя наступает при достижении плотности дислокаций  $\rho \cong 0,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , что позволяет принять

эту характеристику как внутренний параметр, контролирующий усталостное разрушение.

Отмечая ведущую роль дислокаций в процессе пластической деформации материалов и образования зародышевых трещин, нельзя не учитывать влияние других дефектов. Об обоснованности этого вывода свидетельствует следующий пример. Все кристаллические материалы обладают весьма высокой плотностью вакансий, достигающей в сильно наклепанных материалах до  $10^{18}..10^{19}$  атомов/см<sup>-3</sup>. Столь высокая плотность точечных дефектов обуславливает возможность чисто вакансионного механизма появления микропор, слияние которых может стать очагом трещины, а также центром адсорбции или окисления. Скорости движения вакансий невысоки, но вакансии способны объединяться в устойчивые комплексы (дивакансии, тривакансии и др.), подвижность которых может быть весьма высокой. Кроме того, вакансии вступают в активное взаимодействие с дислокациями, создавая вокруг них определенную атмосферу. По мере деформирования материалов помимо накопления дислокаций и вакансий в них происходят полигонизация, текстурирование, измельчение зерен и др. процессы. Характерной особенностью материала поверхностного слоя является наличие текстуры, вызывающей анизотропию его механических свойств. Данная анизотропия является вторичной, т. е. результатом пластической деформации материала в зоне фактических пятен контакта взаимодействующих твёрдых тел.

Несмотря на успехи в металлофизическом изучении поверхностей, эксплуатируемых в различных условиях, в технической литературе отсутствуют сведения о расчетных моделях напрямую учитывающих экспериментальные данные структурного микроанализа модифицированных поверхностных слоев и аналитические оценки параметров повреждаемости. Однако важная роль особенностей структуры и свойств модифицированных в процессе эксплуатации поверхностных слоев в кинетике их разрушения требует обязательного учета в расчетных моделях если не прямых структурных характеристик, то хотя бы структурно-чувствительных параметров. В качестве примера использования металлофизического подхода к прогнозированию эксплуатационных свойств можно привести регрессионную расчетную модель для оценки весового износа двухфазного поликристаллического материала, представленную в работе [8]

$$J_m = a_0 + a_1 \frac{(6.4 + d \cdot A_y / \delta)^2}{HB^{1.75} d^2 b^2 (\rho_{кр} - \rho_0)^2} \quad (мг), \quad (5.10)$$

где  $a_0, a_1$  – коэффициенты регрессии;  $\rho_{кр}$  – критическое значение плотности дислокаций, м<sup>-2</sup>;  $\delta$  – размер частиц второй фазы;  $HB$  – твердость поверхности трения;  $d$  – размер зоны сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса;  $A = \pi d^2 / \Lambda^2$  – концентрация частиц второй фазы;  $\Lambda$  – расстояние между частицами.

Несмотря на то, что использование металлофизического подхода к изучению механизмов структурной деградации поверхностных слоев при эксплуатации связано с большими теоретическими и экспериментальными сложностями, по своей сути он является многообещающим. Его дальнейшее развитие связано с изучением синергетических явлений и установлением связи между процессами, протекающими на разных масштабных уровнях.

**Энергомеханический подход.** Энергомеханический подход основан на обосновании энергетических затрат внешнего силового контактного воздействия на материал с целью формирования на поверхности эффективных, с точки зрения обеспечения требуемых эксплуатационных свойств, показателей качества поверхностного слоя деталей. Данный подход привлекателен своей универсальностью для оценки технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин и позволяет получить полуэмпирические модели управления процессом обработки путём изменения технологических режимов. Обобщённо энергомеханический подход можно представить в виде

$$A_n = \int_0^{h_2} F_2(\nu, \beta, m, R, \sigma_0) dh + \int_{h_2}^0 F_2(\nu, \beta, m, R, \sigma_0) dh, \quad (5.11)$$

где  $h_2$  – глубина лунки, обусловленная пластической деформацией;  $F_2$  – сила пластической деформации в функции от показателей качества поверхности материала;  $A_n$  – удельная работа пластической деформации.

Применяя этот подход В.В.Петросов [9] провёл анализ энергетического баланса процесса внедрения обрабатывающего тела в обрабатываемую поверхность:

$$\mathcal{E}_y = \mathcal{E}_{пл.д} + \mathcal{E}_{тр} + \mathcal{E}_{жс} + \mathcal{E}_в + \mathcal{E}_{упр.}, \quad (5.12)$$

где  $\mathcal{E}_y$  – энергия удара;  $\mathcal{E}_{пл.д}$  – энергия, запасенная в теле детали в результате пластической деформации,  $\mathcal{E}_{тр}$  – энергия, затрачиваемая на трение,  $\mathcal{E}_{жс}$  – энергия, идущая на преодоление жидкостной пленки,  $\mathcal{E}_в$  – волновая энергия,  $\mathcal{E}_{упр.}$  – энергия упругого восстановления.

Он установил полуэмпирическую формулу для определения удельной работы необходимой для обеспечения повышения эксплуатационных свойств деталей в процессе их гидродробеструйного упрочнения:

$$A = 262 \cdot 10^{-6} \cdot n_{\sigma}^3 \omega_A T_n \varepsilon_{\sigma}^4 D^3, \quad (5.13)$$

где-  $n_{\sigma} = \frac{D_{пл.д.}}{\gamma}$  – коэффициент пропорциональности;  $D_{пл.д.}$  – диаметр зоны

пластической деформации;  $\omega_A$  – коэффициент, учитывающий реальные условия;  $T_n$  – величина минимальных касательных напряжений, необходимых

для движения дислокаций;  $\varepsilon_{\partial} = \frac{\gamma}{D}$  - интенсивность деформации;  $D$  - диаметр обрабатываемого тела.

Для оценки сопоставимости влияния технологических режимов и способов упрочнения на эксплуатационные свойства деталей целесообразно использовать обобщенные критерии, которые, с одной стороны могли бы отражать процессы, происходящие при пластической деформации, а с другой - объединять основные параметры обработки поверхности. Комплексной характеристикой структуры и свойств поверхностного слоя после упрочнения является величина запасенной (или скрытой) энергии деформирования, которая пропорциональна плотности образующихся структурных дефектов. Дефекты строения (вакансии, дислокации, границы блоков и др.) искажают кристаллическую решетку, создают в ней достаточно устойчивые упругие поля напряжений, которые сохраняются после деформирования. Например, М.Д.Генкиным на основе предположения, что энергия, запасенная в поверхностном слое металла, пропорциональна количеству кинетической энергии подводимой к поверхности металла в процессе силового воздействия на неё предложен обобщенный критерий оценки режимов дробеударного упрочнения в виде величины удельной кинетической энергии, сообщаемой дробью единице поверхности в единицу времени:

$$E_{y\partial} = \frac{Q_{\partial} V_{\partial}^2}{2gS_n}, \quad (5.14)$$

где  $Q$  - весовой расход дроби в единицу времени;  $V_{\partial}$  - скорость дроби;  $g$  - ускорение свободного падения;  $S$  - площадь поверхности упрочняемой потоком дроби.

Количество энергии, которое сообщает дробь единице поверхности за время обработки  $\tau$ , составит:

$$E = E_{y\partial} \tau. \quad (5.15)$$

Этот подход позволяет проводить оптимизацию энергосиловых и технико-экономических показателей методов обработки, принятых для технологического формирования показателей качества поверхности, обеспечивающих эффективную работоспособность детали в соответствии с требованиями к её эксплуатации. В рамках такого подхода на основе установления связей силовых факторов процесса с показателями качества и эксплуатационными свойствами детали, появляется возможность обоснованно подойти к выбору технологических режимов обработки, используя в качестве критерия или эксплуатационные требования к детали или показатели качества её поверхности.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований проведённые с использованием энергомеханического подхода и полученные при этом модели технологического обеспечения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей явились одной из исходных предпосылок разработки и развития энергетического подхода, базирующегося на современных достижениях в области физики твердого тела.

**Энергетический подход.** Состояние пластически деформированного в процессе обработки и эксплуатации материала является настолько сложным и неоднородным даже в очень локальных микрообъемах, что это состояние не всегда можно адекватно характеризовать одним механическим или физическим параметром или свойством. В этой связи в последние годы многие исследователи для описания и оценки процессов пластической деформации и разрушения твердых тел все чаще обращаются к энергетическим параметрам. В качестве энергетических параметров выступают основные термодинамические характеристики материала поверхностного слоя: энергия, энтропия, температура и т.д., а расчетные зависимости для прогнозирования эксплуатационных свойств деталей машин строят на основе уравнения баланса энергии (энтропии)

Интерес к микроскопическим актам образования дефектов обусловлен прежде всего тем, что между поведением материалов на микро- и макроуровнях существует тесная взаимосвязь. Установить эту связь можно на основе энергетического подхода, базирующегося на термодинамической теории прочности и разрушения твердых тел. Согласно этой теории появление каждого дефекта влечет за собой соответствующее изменение общего состояния поверхностного слоя, характеризуемого внутренней энергией и энтропией, а поверхностный слой можно рассматривать как открытую термодинамическую систему, способную обмениваться энергией и веществом с окружающей средой. Наличие сорбционных процессов на поверхности материалов делает их схожими с мембранами, но, в отличие от обычных мембранных систем, поверхностный слой обладает еще и объемными характеристиками и, следовательно, комплексом собственных интенсивных характеристик. В рамках энергетического подхода стало возможным пользоваться общими понятиями и использовать параметры состояния, пригодные для описания любых макроскопических систем, а также в удобной форме, через изменение термодинамических потенциалов, учитывать адсорбционные и другие эффекты.

Энергетическое представление состояния деформируемого твердого тела целесообразно по следующим причинам.

1. Энергия – универсальная характеристика объекта. Любые внешние воздействия и внутренние условия на любых масштабных уровнях сводимы к соответствующему энергетическому описанию.

2. Энергия системы является однозначным параметром ее состояния. Любые изменения, происходящие с материалом в процессе деформации, взаимодействия со средой и т.д. можно представить как перемещение фазовой точки (ФТ) системы в одномерном энергетическом фазовом пространстве.

3. Энергия обладает свойством аддитивности. Любую энергетическую характеристику можно представить как алгебраическую сумму составляющих ее компонентов, выделенных по определенному признаку.

4. Энергия подчиняется фундаментальному закону сохранения при любых превращениях, справедливому как для отдельных частиц, так и для системы в целом. При этом для каждого процесса, в том числе повреждаемости, справедливы уравнения энергетического баланса.

5. Энергия имеет четкий физический смысл и лучше всего соответствует сущности понятий о прочности как о потенциальных энергетических барьерах, препятствующих протеканию в системе кинетических (необратимых) процессов.

6. Энергия не изменяет свой смысл и значение при любом представлении объекта, т.е. обладает свойством транзитивности. Оперирование энергией как внутренним состоянием материала позволяет использовать хорошо математизированные методы квантовой механики, статистической физики, неравновесной термодинамики, теории упругости и других фундаментальных наук.

Энергетический подход к оценке технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин предусматривает следующие концептуальные положения:

1. Поверхность твердого металлического тела рассматривается как квазисложная и неоднородная среда, в объемах которой статистически равномерно распределены структурные элементы и различного рода дефекты и повреждения; одни из них являются внутренними источниками и стоками элементарных дефектов (вакансий, атомов внедрения и др.), другие – препятствиями к их движению. В зависимости от условий процесса деформирования функциональная роль дефектов и повреждений может изменяться.

2. Микроскопическое явление пластической деформации, повреждаемости и разрушений элемента поверхности твердого тела при внешнем силовом воздействии рассматривается как совокупность огромного числа микроскопических элементарных актов атомно-молекулярных перегруппировок, обуславливающих генерирование (размножение), движение, взаимодействие и уничтожение на стоках различного рода элементарных дефектов. Интенсивность пластической деформации элемента поверхности тела определяется скоростью генерирования (размножения), движения и уничтожения элементарных дефектов

за счет флуктуаций тепловой энергии в поле внешних сил. Повреждаемость материала поверхности в ходе пластической деформации связана с накоплением в деформируемых объемах различного рода дефектов и их скоплений. При этом в результате взаимодействия большого числа элементарных дефектов образуются более сложные дефекты и повреждения, являющиеся источниками и стоками элементарных дефектов. Разрушение микроскопического элемента поверхности твердого тела происходит, когда в его объемах ответственных за разрушение, плотность дефектов и повреждений достигает критической (предельной) величины.

3. Процесс пластической деформации поверхностного слоя рассматривается, как конкуренция двух противоположных, взаимосвязанных и одновременно протекающих в деформируемых объемах поверхности тела тенденций – роста плотности скрытой энергии  $\Delta E_c$  различного рода дефектов и повреждений, накапливающихся в материале за счет работы внешних сил  $A_{пл.}$  и снижения (высвобождения) её за счет различного рода релаксационных процессов, протекающих внутри деформируемого элемента тела; при этом первая тенденция связана с деформационным упрочнением и повреждаемостью, вторая – с динамическим возвратом (отдыхом), обуславливающим тепловой эффект пластической деформации  $q$ .

4. Накапливаемая в деформируемом элементе поверхностного слоя внутренняя энергия  $\Delta E$  включает потенциальную (скрытую) и кинетическую (тепловую). Эта энергия связана с повреждаемостью материала ( $\Delta E_c$ ) и его термическим разупрочнением ( $\Delta E_T$ ), следовательно, является ответственной за его упрочнение и разрушение поверхностного слоя детали.

5. За параметр повреждаемости поверхностного слоя принимается плотность накопленной в деформируемом элементе поверхностного слоя внутренней энергии  $E$ . Элемент пластически деформируемого поверхностного слоя считается максимально упрочненным, когда плотность  $E$  внутренней энергии достигает предельной величины  $E^*$ . Под предельной плотностью внутренней энергии, накапливаемой в деформируемом элементе поверхностного слоя, понимается величина накопленной энергии при которой энергетическое состояние локальных микрообъемов и соответственно поверхностного слоя, сохраняют (без разрушения) его прочностные свойства, обеспечивающие эффективную эксплуатацию детали после обработки её технологическими методами. Следовательно, величина предельной плотности внутренней энергии может быть предложена в качестве критерия эксплуатации детали, а энергетическое условие предельной деформируемости элемента поверхностного слоя может быть записано в виде:

$$E(t_i) = E_0(0) + \Delta E(t_i) = E^* = const, \quad (5.16)$$

где  $E_0(0)$  - плотность внутренней энергии в элементе поверхностного слоя в исходном (до эксплуатации) состоянии ( $t=0$ ), учитывая наследственные свойства материала;  $\Delta E(t_i)$  - изменение плотности внутренней энергии в элементе поверхностного слоя при  $i$ -том цикле силового нагружения в процессе эксплуатации.

Примером оптимальной по сложности и энергетически обоснованной является расчетная зависимость для оценки скорости изнашивания материалов в условиях стационарного режима трения, полученная В.В. Федоровым

$$i = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{U_b}{\Delta u_* - \Delta u_{Tf}} = \frac{\delta_b w}{u_* - u_0 - \Delta u_{Tf}}, \quad (5.17)$$

где  $U_b$ ,  $u_*$ ,  $u_0$ ,  $\Delta u_{Tf}$  - соответственно скорость изменения скрытой энергии в поверхностном слое, отнесенная к единице поверхности трения, критическая и начальная плотность внутренней энергии и плотность тепловой составляющей скрытой энергии;  $V$  - объем продуктов износа;  $\dot{V}$  - объемная скорость изнашивания;  $S$  - площадь поверхности трения;  $\delta_b$  - относительная величина скрытой энергии;  $w$  - удельная мощность трения.

Другим примером обоснованности применения энергетического подхода к оценке эксплуатационных характеристик деталей являются результаты теоретических и экспериментальных исследований проведенных на кафедре «Технология машиностроения» ДГТУ, позволившие установить зависимость для определения усталостной долговечности поверхностного слоя детали в виде

$$t_p = \tau_0 \exp \left( \frac{\Delta H + L_{nl} - \Delta U_n - k_\phi k_a V_m 10^{-6} \sigma \Delta \varepsilon_{кр}}{RT} \right), \quad (5.18)$$

где  $t_p$  - продолжительность роста внутренней энергии в процессе эксплуатации до разрушения, с;  $\tau_0$  - период тепловых колебаний атомов,  $\tau_0 = 10^{-12}$  с;  $\Delta H$  - разность теплосодержания (энтальпии) материала в твёрдом состоянии, при температуре плавления и энтальпии при 293°K;  $L_{nl}$  - скрытая теплота плавления.  $\Delta U_n = E_0$  энергетическое состояние поверхностных слоёв деталей до эксплуатации;  $V_m$  - молярный объём, мм<sup>3</sup>/моль;  $k_\phi$  - коэффициент формы,  $k_\phi = D/\sigma \varepsilon$ , где  $D$  - фактическая необратимая затраченная работа (площадь под кривой «напряжение-деформация»);  $k_a$  - коэффициент аккумуляирования энергии, показывающий долю запасённой энергии относительно всей затраченной работы  $D$ , по данным [ 7,8 ] для отожженных сталей  $k_a = 0,25 - 0,3$ , для упрочнённых сталей  $k_a = 0,05 - 0,1$ ;  $\sigma$  - эквивалентное напряжение, определяемое характером силового воздействия на локальный объём (статическое, динамическое,

циклическое);  $T$  - абсолютная температура, К; в реальных условиях эксплуатации;  $R = 0,008314$  кДж/К·моль.

Данное уравнение даёт возможность проводить оценку долговечности поверхностных слоёв деталей, эксплуатируемых в условиях знакопеременных нагрузок и усталостного изнашивания. Из уравнения 4.18 следует, что усталостная долговечность деталей зависит от энергетического состояния поверхностного слоя, полученного на стадии изготовления детали; степени его напряжённости, обусловленной характером внешнего силового воздействия на него; критической величиной относительной пластической деформации для соответствующих условиям эксплуатации состояния материала.

## **5.2 Автоматизация обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин на стадии конструкторско-технологической подготовки производства**

Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин на стадии конструкторско-технологической подготовки производства предопределяет решение двух задач:

- 1) Выбор материала деталей и обоснованное назначение параметров качества их рабочих поверхностей и точности размеров, которые обеспечили бы требуемые эксплуатационные свойства.
- 2) Выбор метода и расчёт рациональных режимов обработки, обеспечивающих экономичное получение требуемых характеристик качества обрабатываемых поверхностей и точности размеров.

Решение первой (конструкторской) задачи должно базироваться на тщательном анализе функционального назначения того или иного изделия. При этом, необходимо однозначно обосновать, какие эксплуатационные свойства проектируемого изделия лимитируют надежность машины в целом. Это связано с тем, что в зависимости от требуемых эксплуатационных свойств должен осуществляться выбор материалов соединяемых деталей, назначение точности размеров и параметров качества их поверхности, руководствуясь соответствующими зависимостями и рекомендациями, полученными в результате теоретических и экспериментальных исследований.

Параметры качества рабочих поверхностей и точность размеров должны назначаться с учётом условий эксплуатации. В процессе решения задачи рационального назначения параметров качества рабочих поверхностей и точности размеров детали конструктор должен переработать значительный объем информации, произвести большое количество вычислений по соответствующим теоретическим или экспериментальным зависимостям.

Поэтому решение этой задачи наиболее рационально выполнять с помощью ЭВМ, используя алгоритм последовательных действий приведённый на рис. 5.3.



Рис. 5.3. Алгоритм решения конструкторской задачи по обеспечению требуемых эксплуатационных свойств деталей машин

На основе совместного анализа условий нормальной эксплуатации (блок 1) и технических условий на изделие (блок 2) осуществляется определение требуемых эксплуатационных свойств поверхностей деталей и допустимых пределов их изменения. Например, если суммарное сближение контактирующих поверхностей вследствие износа не должно превышать 5—7 мкм, а величина контактного сближения должна быть не более 2—5 мкм при возрастании нагрузки на стык до номинальной величины, то это значит, что поверхности деталей, образующие рассматриваемый стык, должны быть износостойкими и иметь высокую контактную жесткость. Следует отметить, что переход от блоков 1 и 2 к блокам 3 и 4 является неформализованным, т.е. практически не поддается алгоритмизации. Это означает, что на данном этапе проектирования весьма

важным фактором является опыт конструктора, основанный на результатах практической работы, теоретических и экспериментальных исследований.

После того как определены требуемые эксплуатационные свойства проектируемых деталей, допустимые пределы их изменения и материал, осуществляется поиск соответствующих теоретических или экспериментальных зависимостей, которые характеризуют количественную сторону взаимосвязи между данным эксплуатационным свойством, параметрами качества поверхности и условиями эксплуатации (блок 5). Подобные зависимости приведены в п. 5.2 В них параметры качества поверхностей являются аргументом, а эксплуатационное свойство — функцией.

В блоке 6 осуществляется расчет параметров качества рабочих поверхностей деталей и точности размеров, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства в допустимых пределах их изменения. Иными словами, подбираются значения аргумента, удовлетворяющие заданной функции. Решение этой задачи усложняется тем обстоятельством, что на аргумент накладываются ограничения, так как параметры качества реальных поверхностей и точность размеров не могут изменяться в бесконечных пределах. Поэтому в ряде случаев совместное обеспечение нескольких эксплуатационных свойств может оказаться невозможным. В таких случаях необходимо выбрать наиболее важные из них или расширить допустимые пределы их изменения и повторить расчет. Необходимо отметить, что чем шире допустимые пределы изменения эксплуатационных свойств, тем легче решить задачу конструктора по определению требуемых параметров качества поверхностей. Учитывая это, следует обоснованно определять допустимые границы изменения эксплуатационных свойств поверхностей и не стремиться к их искусственному сужению.

В блоке 7 осуществляется расчет допустимых границ изменения параметров качества поверхностей деталей машин и точности размеров. Эти данные необходимы при решении задачи технолога. Определение допустимых пределов изменения параметров качества поверхностей деталей машин и точности размеров осуществляется с учетом обеспечения требуемых эксплуатационных свойств в заданных пределах их изменения. Таким образом, чем уже определены допустимые интервалы изменения эксплуатационных свойств в блоке 3, тем уже получаются расчетные допустимые границы изменения параметров качества поверхностей и точности размеров деталей машин.

Итак, решение *конструкторской* задачи, начиная с блока 5, является в достаточной степени формализованным, т.е. может быть алгоритмизировано и с успехом осуществлено на ЭВМ. Зависимости, используемые в блоке 5, могут

храниться в базе САПР. После выбора соответствующего метода вычислений составляется программа расчета. На этом завершается решение конструкторской задачи по обоснованному назначению параметров качества рабочих поверхностей и точности размеров деталей машин, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства.

Результат решения конструкторской задачи (блок 7, рис. 5.3) является частью исходных данных технологической задачи.

Решение технологической задачи также целесообразнее выполнять с помощью САПР ТП, используя алгоритм, представленный на рис. 5.4

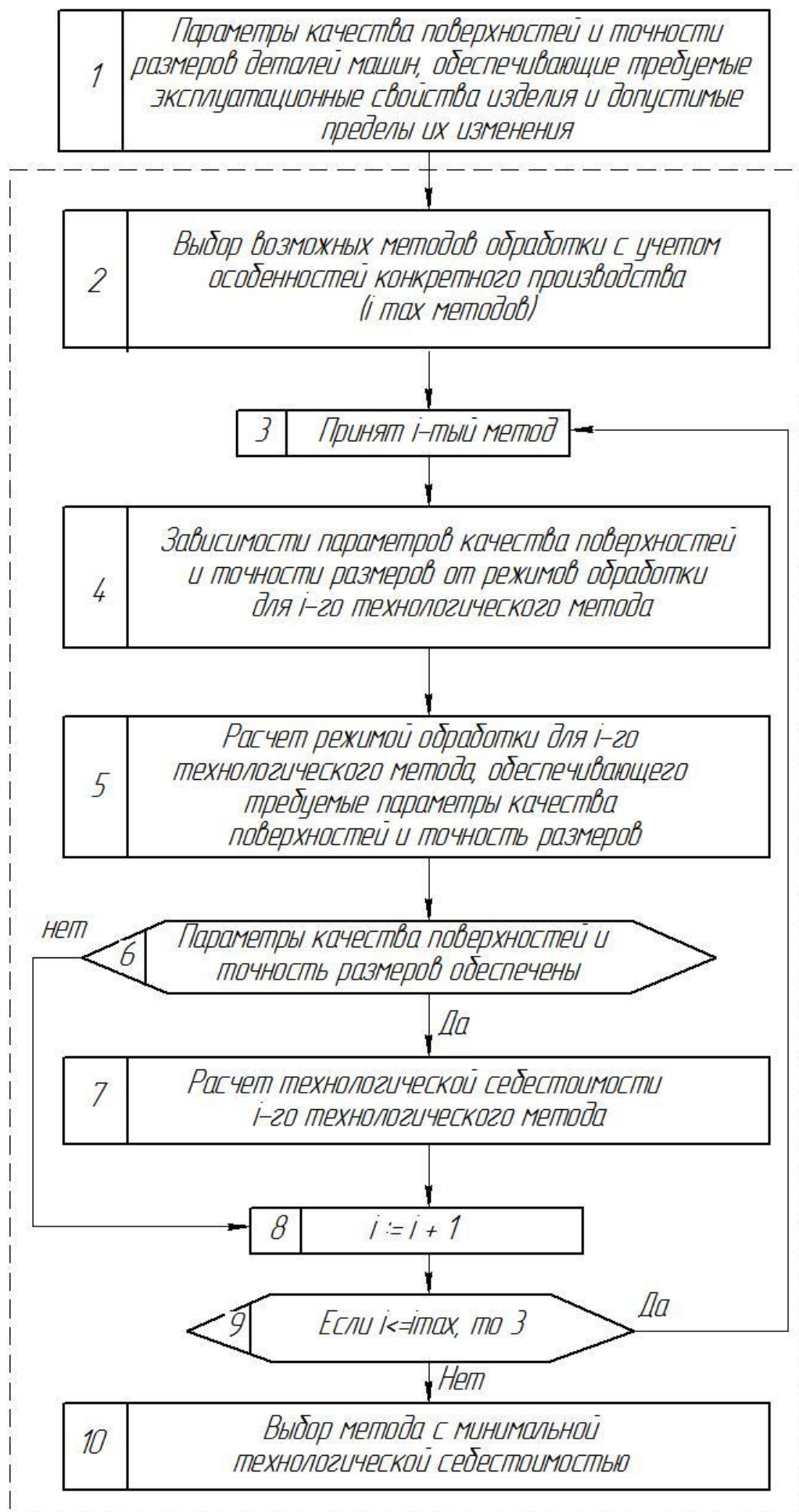


Рис. 5.4. Алгоритм решения технологической задачи по обеспечению требуемых параметров качества поверхности

В блоке 1 данного алгоритма заложена информация, взятая из чертежа и технических требований на конкретную деталь, для которой проводятся расчеты.

В блоке 2 осуществляется выбор возможных методов обработки. Данный этап решения задачи можно проводить с помощью ЭВМ при наличии в ней соответствующих массивов информации, которые включают в себя данные о наличии станочного парка, инструмента, технологической оснастки для условий конкретного производства. При этом необходимо осуществлять наряду с выбором методов финишной обработки выбор предварительной обработки, если последняя сказывается на качестве окончательно обработанной поверхности. Выбранные методы обязательно должны обеспечивать требования точности обработки, иначе технологический процесс будет неприемлемым и проведение дальнейших расчетов теряет смысл. Это подчеркивает большую важность данного этапа для успешного решения задачи технологического обеспечения качества деталей машин на стадии их изготовления.

В дальнейшем, в блоке 3 принимается  $i$ -тый метод обработки, для которого в блок 4 из массива памяти ЭВМ выбираются соответствующие зависимости параметров качества поверхности и точности размеров от условий обработки. Причем наряду с указанными зависимостями выбирается область факторного пространства, внутри которой адекватно описывается поверхность отклика.

Расчет условий обработки для  $i$ -го метода, которые обеспечивают требуемые параметры качества поверхности и точность размеров, назначенные конструктором, производится в блоке 5. На данном этапе заданные конструктором параметры качества являются функцией, а искомые условия обработки — аргументами. Таким образом, стоит задача отыскания аргумента по заданной функции. Причем в общем случае одни и те же значения аргумента должны удовлетворять нескольким функциям, так как необходимо технологически обеспечить несколько параметров качества поверхности. Конечно, если требуется обеспечить лишь один параметр качества (например,  $Ra$ ), задача существенно упрощается, но это встречается в очень редких случаях. Кроме того, осложнения при решении возникают и в связи с тем, что условия обработки могут изменяться лишь в заданной области изменения факторов, которая выбирается вместе с соответствующими зависимостями в блоке 4. Все это указывает на то, что совместное решение системы уравнений,

связывающих требуемые параметры качества поверхностей и точность размеров с условиями конкретного метода обработки, ввиду наличия ряда ограничений представляет значительную трудность, а зачастую такого решения может и не быть.

Поиск совместного решения существенно облегчается тем, что требуемые параметры качества поверхностей и размеры деталей машин задаются конструктором вместе с допустимыми границами их изменения, которые рассчитываются в блоке 7 (см. рис. 5.4). Чем шире эти границы, тем легче технологу решить свою задачу. Если различные комбинации условий обработки не позволяют обеспечить требуемые параметры качества поверхности и точность размеров, то это значит, что рассматриваемый метод обработки в данном случае неприемлем.

Экономически целесообразнее применить метод обработки, имеющий наименьшую технологическую себестоимость. Поэтому в блоке 7 рассчитывается технологическая себестоимость методов обработки, которые обеспечивают заданные параметры качества поверхностей и точность размеров деталей, после чего через блоки 8 и 9 осуществляется переход к блоку 3, и расчеты повторяются для следующего  $(i+1)$ -го метода обработки по схеме. После проведения расчетов для всех возможных методов обработки, выбранных в блоке 2, в блоке 10 осуществляется окончательный выбор метода обработки конкретной поверхности, обеспечивающего получение параметров ее качества и точность размеров в допустимых пределах и имеющего минимальную себестоимость.

Необходимо отметить, что технологические расчеты, начиная с блока 2, являются формализованными и могут успешно осуществляться на ЭВМ после выбора соответствующих вычислительных методов.

Объединив структурные схемы, показанные на рис. 5.3 и 5.4, получим общую структурную схему автоматизации обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин на стадии конструкторско-технологической подготовки производства (рис. 5.5).

## Исходные данные

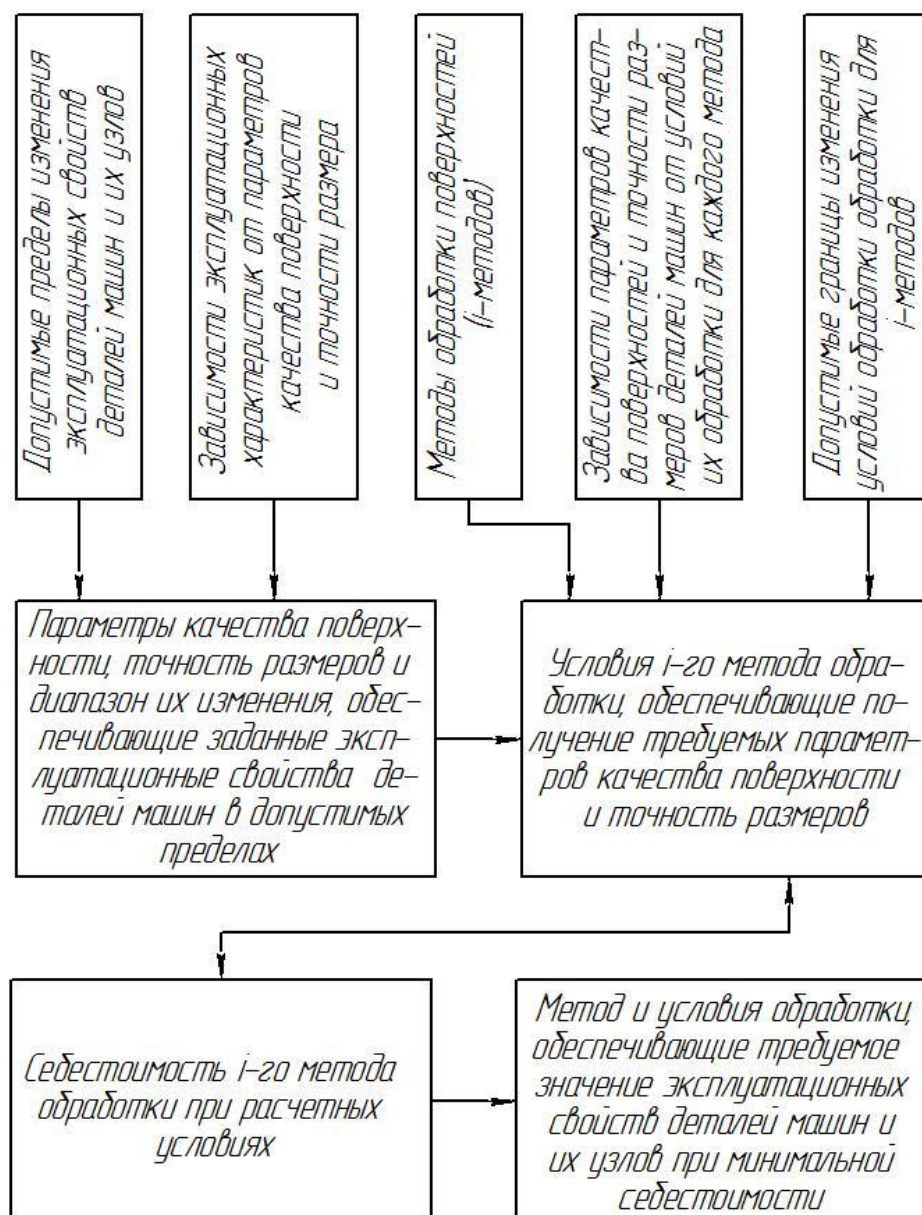


Рис.5.5. Структурная схема автоматизации обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин на стадии конструкторско-технологической подготовки производства с использованием САПР.

Для успешного решения поставленной задачи в качестве исходных данных необходимо знать следующее:

- перечень эксплуатационных свойств с допустимыми пределами их изменения, которым должны удовлетворять детали машин и их узлы;
- теоретические или экспериментальные зависимости, связывающие эксплуатационные свойства с параметрами качества поверхностей и точностью размеров деталей машин;

- возможные технологические методы обработки рассматриваемых деталей машин;
- теоретические или экспериментальные зависимости параметров качества поверхности и точности размеров от условий обработки для технологических методов и область определения этих зависимостей.

Преимущества автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства очевидны не только при использовании станков с ЧПУ. Они весьма значительны при разработке технологических процессов для обычных станков, особенно в единичном и мелкосерийном производствах.

В заключение следует отметить, что автоматизация обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин на стадии конструкторско-технологической подготовки производства является весьма актуальной проблемой, которая еще во многом ждет своего решения.

Достижение поставленных целей на современных предприятиях, выпускающих сложные технические изделия, оказывается невозможным без широкого использования *автоматизированных систем (АС)*, основанных на применении компьютеров и предназначенных для создания, переработки и использования всей необходимой информации о свойствах изделий и сопровождающих процессов. Специфика задач, решаемых на различных этапах жизненного цикла изделий, обуславливает разнообразие применяемых АС.

На рис. 5.6 указаны основные типы АС с их привязкой к тем или иным этапам жизненного цикла изделий.



Рис. 5.6. Основные типы автоматизированных систем

Автоматизация проектирования осуществляется САПР. В САПР машиностроительных отраслей промышленности принято выделять системы функционального, конструкторского и технологического проектирования. Первые из них называют системами расчетов и инженерного анализа или *системами CAE* (Computer Aided Engineering). *Системы конструкторского проектирования* называют системами CAD (Computer Aided Design). Проектирование технологических процессов выполняется в автоматизированных системах технологической подготовки производства (*АСТПП*), входящих как составная часть в *системы CAM* (Computer Aided Manufacturing).

Для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения, координации работы систем CAE/CAD/CAM, *управления проектными данными* и проектированием разрабатываются системы, получившие название систем управления проектными данными PDM (Product Data Management). Системы PDM либо входят в состав модулей конкретной САПР, либо имеют самостоятельное значение и могут работать совместно с разными САПР.

Управление данными в едином информационном пространстве на протяжении всех этапов жизненного цикла изделий возлагается на систему управления жизненным циклом продукции PLM (Product Lifecycle Management). Характерная особенность PLM — обеспечение взаимодействия различных автоматизированных систем многих предприятий, т.е. технологии PLM (включая технологии CPC) являются основой, интегрирующей информационное пространство, в котором функционируют САПР, ERP, PDM, SCM, CRM и другие автоматизированные системы многих предприятий.

### **Контрольные вопросы к главе 5.**

1. В чем заключается аналитическая оценка и прогнозирование эксплуатационных свойств деталей машин?
2. Перечислите основные подходы к аналитической оценке и прогнозированию эксплуатационных свойств деталей машин.
3. В чем заключается сущность феноменологического подхода к аналитической оценке и прогнозированию эксплуатационных свойств деталей машин?
4. В чем заключается сущность механического подхода к аналитической оценке и прогнозированию эксплуатационных свойств деталей машин?
5. Чем отличаются расчетно-аналитические модели прогнозирования эксплуатационных свойств деталей машин от эмпирических?

6. В чем заключается сущность металлофизического подхода к аналитической оценке и прогнозированию эксплуатационных свойств деталей машин?
7. На чем основан энерго-механический подход к аналитической оценке и прогнозированию эксплуатационных свойств деталей машин?
8. В чем состоят преимущества энергетического подхода к аналитической оценке и прогнозированию эксплуатационных свойств деталей машин?
9. Какие концептуальные положения лежат в основе энергетического подхода к аналитической оценке и прогнозированию эксплуатационных свойств деталей машин?
10. Решение каких задач предопределяет технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин?
11. Поясните алгоритм решения конструкторской задачи по обеспечению требуемых эксплуатационных свойств деталей машин.
12. Поясните алгоритм решения технологической задачи по обеспечению требуемых параметров качества поверхности.
13. Какие исходные данные необходимы для САПР конструкторско-технологической подготовки производства?

## Использованная литература

1. Лебедев В.А. Энергетические аспекты упрочнения деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования: монография / В.А. Лебедев – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007 – 156 с.
2. Сулима А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов/ А.М. Сулима, М.И.Евстигнеев-М.: Машиностроение, 1974-256с.
3. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения/ А.Г. Суслов, А.М.Дальский- М.: Машиностроение, 2002-684с.
4. Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокаций/ С. Амелинкс- М.: «Мир», 1968-232с.
5. Колмогоров Л.М. Напряжения .Деформации. Разрушение./ Л.М. Колмогоров- М.: Металлургия, 1970-229с.
6. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием/ В.М. Смелянский- М.: Машиностроение, 2002-299с.
7. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел / Федоров В.В. – Ташкент: Издательство ФАН, 1979-168 с.
8. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. –387 с.
9. Фёдоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твёрдых тел/ В.В. Фёдоров– Ташкент: Издательство ФАН, 1985-166 с.
10. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин/ Э.В. Рыжов, А.Г.Суслов, В.П.Фёдоров- М.: Машиностроение, 1979-176с.
11. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений/ Под общей ред. А.Г Суслова-. М.: Машиностроение, 2006-448с.
12. Исаев Н.И. Теория коррозионных процессов, М.: Металлургия, 1997-350с.
13. Когаев В.П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность/ В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков- М.: Машиностроение, 1983-224с.
14. Крагельский И.В. Основы расчета на трение и износ/ И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов- М.: Машиностроение, 1977-540с.
15. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин/ А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин- М.: Машиностроение, 1988-289с.
16. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента/ В.В. Петросов- М.: Машиностроение, 1977-166с.
17. Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Научное издание – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006 – 183 с.
18. Иванова В.С. Природа усталости металлов/ В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. -272с.

19. Лебедев В.А. Технология и организация восстановления деталей и сборочных единиц / В.А. Лебедев, Ю.М.Самодумский, Ю.В. Марченко и др.- Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2012-300с.
20. Технологические основы обеспечения качества машин/ К.С.Колесников, Г.Ф.Баландин, А.М.Дальский и др; Под общ.ред. К.С.Колесникова- М.: Машиностроение, 1990-256с.
21. Мельников А.С. Технология машиностроения: основы достижения качества машины/ А.С. Мельников.- Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2009
22. Безъязычный В.Ф. Технологические процессы механической и физико-механической обработки в авиадвигателестроении
23. Бабичев А.П. .Основы вибрационной технологии
24. Справочник технолога-машиностроителя. Т.1.
25. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. ГОСТ 2789-73 (СТ СЭВ 638-77).
26. Тихонов Д. А. Повышение стойкости режущих инструментов с износостойким покрытием путем отделочно-упрочняющей обработки их рабочих поверхностей алмазным выглаживанием. Автореферат к.т.н.

## Приложения

### Приложение А

#### Рекомендуемые значения параметров шероховатости поверхности деталей машин

Поверхности	Ra, мкм	t <sub>20</sub> , %	l, мм
<b>Опорных шеек валов:</b>			
под подшипники скольжения	0,32	30	0,8
под вкладыши из бронзы	0,4	15	0,8
под баббитовые вкладыши	0,25	20	0,25
под вкладыши из чугуна и из графитопласта АМС-1	0,32	40	0,8
под подшипники качения	0,8	—	0,8
Обеспечивающие явление избирательного переноса	0,25	15	0,25
Посадочных шеек валов под зубчатые колеса	1,6	—	0,8
Валов, работающих при знакопеременных нагрузках	R <sub>max</sub> = 1	60	0,8
Шариковых и роликовых подшипников	0,08	15	0,25
<b>Поршня:</b>			
юбки	0,8	—	0,8
отверстия под палец	0,5	—	0,8
Наружная поршневого пальца	0,25	15	0,25
Шеек и кулачков распределительных валов	0,32	30	0,8
Плунжерных пар	0,08	15	0,25
Отверстий рычагов вилок, сопрягаемых с валами или осями	0,63	—	0,8
Посадочных отверстий зубчатых колес	0,5-2	—	0,8
<b>Боковые:</b>			

зубьев колес	0,63-1,25	—	0,8
витков червяка	0,32	—	0,25
Основных отверстий корпусов:			
из чугуна	1-2	—	0,8
из стали	0,63-1,6	—	0,8
Сопрягаемые корпусов и крышек	Rz= 10	—	2,5
Направляющих трения-скольжения:			
универсальных станков	0,63	—	0,8
прецизионных станков	0,1	15	0,25
тяжелых станков	1,6	—	0,08
Направляющих качения	0,16	—	0,25
Рабочие:			
цилиндров	0,4	40	0,8
поршневых колец	0,25	—	0,25
коленчатых валов:			
коренные шейки	0,32	30	0,8
шатунные шейки	0,25	20	0,25
Напыленные, трения скольжения	0,08	10	0,25
Под напыление	Rz= 125;	—	0,8
	Sm=0,5мм		
Под электрохимические покрытия	0,2-0,8	—	—
Корродирующие	0,063;	10	0,25
	Sm= 0,032мм		
Под склеивание	Rz= 15	—	—

## Приложение Б

### Шероховатость поверхности при различных методах обработки

Обработка	Параметры шероховатости			
	Ra, мкм	Sm, мм	S, мм	t <sub>20</sub> , %
Наружные поверхности вращения				
Обтачивание:				
черновое	12,5-50	0,32-0,25	0,32-1,25	10-15
получистовое	3,2-12,5	0,160-0,40	0,160-0,40	10-15
чистовое	0,8-2,5	0,080-0,160	0,050-0,160	10-15
тонкое	0,1-0,8	0,020-0,100	0,010-0,100	10-15
Шлифование:				
предварительное	1-2,5	0,063-0,20	0,032-0,160	10
чистовое	0,2-1,25	0,025-0,100	0,010-0,080	10
тонкое	0,05-0,25	0,008-0,025	0,003-0,160	40

Суперфиниширование	0,032-0,28	0,06-0,020	0,003-0,016	10
Полирование	0,008 -0,08	0,008-0,025	0,002-0,08	10
Притирка	0,01-0,11	0,006-0,04	0,002-0,032	10-15
Обкатывание и выглаживание	0,03-2,0	0,025-1,25	0,025-1,25	10-70
Виброобкатывание	0,063-1,60	0,01-10,5	0,008-0,16	10-70
Электромеханическая	0,02-1,60	0,025-1,25	0,025-1,25	10-70
Магнитно-абразивная	0,02-1,60	0,008 -1,25	0,03-0,16	10-30
Внутренние поверхности вращения				
Сверление и рассверливание	3,2-12,5	0,16-0,8	0,08-0,63	10-15
Зенкерование:				
черновое	3,2-6,3	0,16-0,8	0,063-0,4	10-15
чистовое	1,25-3,2	0,08-0,25	0,05-0,16	10-15
Развертывание: черновое	1,25-2,5	0,08-0,2	0,04-0,16	10-15
чистовое	0,63-1,25	0,032-0,1	0,0125-0,063	10-15
тонкое	0,32-0,63	0,0125-0,04	0,008-0,02	10-15
Протягивание:				
черновое	1,25-3,2	0,08-0,25	0,04-0,2	10-15
чистовое	0,32-1,25	0,02-0,1	0,008-0,08	10-15
Растачивание:				
черновое	6,3-12,5	0,25-1	0,25 - 1	10-15
получистовое	1,6-6,3	0,125-0,32	0,125-0,32	10-15
чистовое	0,8-2,0	0,08-0,16	0,05-0,16	10-15
тонкое	0,2-0,8	0,02-0,1	0,01-0,1	10-15
Шлифование:				
предварительное	1,6-3,2	0,063-0,25	0,032-0,16	10
чистовое	0,32-1,60	0,25-0,1	0,1-0,8	10
тонкое	0,08-0,32	0,008-0,025	0,003-0,016	10
Хонингование:				
предварительное	1,25-3,2	0,063-0,25	0,085-0,16	10
чистовое	0,25-1,25	0,02-0,1	0,008-0,08	10
тонкое	0,04-0,25	0,006-0,2	0,003-0,16	10
Притирка	0,02-0,16	0,005-0,04	0,002-0,02	10-15
Раскатывание и выглаживание	0,05-2	0,025-1	0,025-1	10-70
Виброраскатывание	0,063-1,6	0,01-12,5	0,008-0,16	10-70
Калибрование	0,1-1,6	0,025-1	0,025-1	10-70
Плоские поверхности				

Торцовое фрезерование:				
черновое	3,2-12,5	0,16-0,4	0,16-0,4	10-15
чистовое	1-4	0,08-0,2	0,063-0,2	10-15
тонкое	0,32-1,25	0,025-0,1	0,016-0,08	10-15
Цилиндрическое фрезерование:				
черновое	3,2-12,5	1,25-5	1,25-5	10
чистовое	0,8-3,2	0,5-2	0,5-2	10
тонкое	0,2-1	0,16-0,63	0,1-0,63	10-15
Строгание:				
черновое	6,3-50	0,2-1,6	0,2-1,6	10-15
чистовое	1-6,3	0,08-0,25	0,063-0,25	10-15
тонкое	0,32-1,6	0,025-0,125	0,0125-0,1	10-15
Торцовое точение:				
черновое	25-50	0,2-1,25	0,20-1,25	10-15
чистовое	1,6-6,3	0,08-0,25	0,063-0,25	10-15
тонкое	0,32-1,6	0,025-0,125	0,0125-0,1	10-15
Протягивание:				
черновое	1-3,2	0,16-2	0,16-2	10-15
чистовое	0,32-1,25	0,05-0,5	0,032-0,5	10-15
Шлифование:				
предварительное	1,6-4	0,1-0,32	0,063-0,25	10
чистовое	0,32-1,6	0,025-0,125	0,0125-0,08	10
тонкое	0,08-0,32	0,01-0,032	0,005-0,025	10
Шабрение от себя:				
$Z=20 \div 10$	1,6-6,3	0,2-1	0,125-1	10-15
$Z=30 \div 20$	0,63-2,5	0,063-0,25	0,032-0,2	10-15
Шабрение на себя:				
$A_c = 40 \div 60\%$	0,032-1,00	0,040-0,125	0,02-0,1	10-15
$A_c = 60 \div 80\%$	0,1-0,4	0,016-0,05	0,008-0,032	10-15
Накатывание роликами и шариковыми головками	0,1-2	0,025-5	0,02-5	10-70
Вибронакатывание	0,16-2,5	0,025-12,5	0,02-5	10-70
Виброполирование	0,3-0,032	0,1-0,025	0,004-0,025	10
Притирка	0,02-0,1	0,008-0,04	0,004-0,032	10-15
Боковые поверхности шлицев				
Шлицефрезерование:	6,3-12,5	1-5	1-5	10-15

Предварительное чистовое	1,25-4	0,1-2	0,05-2	10-15
Шлицистрогание	1-2,5	0,08-2,5	0,05-2,5	10-15
Шлицепротягивание	0,8-1,6	0,08-2	0,05-2	10-15
Шлифование: предварительное окончательное	1,6-3,2 0,4-1,25	0,1-0,32 0,032-0,1	0,063-0,25 0,016-0,063	10 10
Накатывание шлицев	0,8-1	0,08-5	0,063-5	10-15
Обкатывание шлицев	0,32- 1	0,063-2	0,032-1,25	10-70
Боковые поверхности зубьев				
Зубонарезание фрезами: модульными червячными	6,3-12,5	1,25-5	1-5	10-15
	3,2-6,3	0,32-1,6	0,2-1,6	10-15
Зубонарезание долбками	1,6-3,2	0,2-1,25	0,125-1,25	10-15
Протягивание	0,8-1,6	0,08-2	0,05 - 2	10-15
Накатывание	0,8-2	0,08-5	0,063 - 5	10-15
Шевингование	0,63-1,25	0,125-0,5	0,08-0,5	10-15
Шлифование	0,5-1,25	0,04-0,1	0,025-0,063	10
Обкатывание	0,32-1	0,063-2	0,032-1,75	10-70
Притирка	0,1-0,5	0,032-0,5	0,02-0,16	10-70
Боковые поверхности профиля резьбы				
Нарезание: резцами и гребенками метчиками, плашками и самораскрывающимися нарезными головками	1,6-3,2	0,08-0,25	0,32-0,16	15-20
	1,6-3,2	0,063-0,2	0,025-0,125	10-15
Фрезерование: предварительное окончательное	1,6-3,2	0,125-0,32	0,063-0,2	10
	0,5-2	0,032-0,125	0,016-0,8	10
Накатывание и раскатывание резьбы	0,5- 1,25	0,04-0,1	0,032-0,08	10-20

Примечания:

1. Для упрочняющей обработки  $R_{\max} = 5R_a$ ;  $R_z = 4R_a$ ; для точения, строгания и фрезерования  $R_{\max} = 6R_a$ ;  $R_z = 5R_a$ , для остальных методов обработки  $R_{\max} = 7R_a$ ;  $R_z = 5,5R_a$ .

2.  $Z$  — число пятен при шабрении на площади  $25 \times 25 \text{ мм}^2$ ;  $A_c$  - контурная площадь касания при шабрении.

Геометрические параметры шероховатости поверхности деталей (при обработке резанием)

Метод обработки	Ra, мкм	v	b	г <sub>п</sub>	г <sub>пр</sub>	г	β <sub>п</sub>	β <sub>пр</sub>	S <sub>п</sub> /	S <sub>пр</sub> /	r/
				мкм					R <sub>max</sub>	R <sub>max</sub>	R <sub>max</sub>
Стальные детали											
Плоское шлифование	5	2,4	2,5	5	250	35	35°	2°0	3	57	2
	2,5	2,25	2,7 5	7	1300	100	25°	1°	4,5	135	10
	1,25	2,2	2,8 5	10	3200	180	15°	30'	8,5	230	30
	0,63	2,1	3	17	8000	370	10°	18'	14	270	120
	0,32	2	3,5	20	15000	550	7°	10'	19	780	350
Торцовое фрезерование	5	1,65	1,8	45	4000	425	20°	50'	7	137	20
	2,5	1,6	2,3	90	9000	900	11°	30'	16	230	90
	1,25	1,6	2,5	120	15000	1350	5°	15'	25	445	200
Внутреннее шлифование	2,5	2	1,9	3,5	8	5	32°	13°	3,5	9	0,5
	1,25	1,95	2	6	11	8	17°	11°	7	10	1,3
	0,63	1,85	2,5	10	16	13	10°	8°	13	15	4
	0,32	1,75	3	15	23	18,5	5°	5°	23	22	12
Круглое шлифование	1,25	2,6	2,3	4	16	8	25°	10°	5	8	1,3
	0,63	2,4	2,6	6,5	22	12	16°	8°	8	15	4
	0,32	2,3	2,8	12	30	20	10°	7°	15	19	12
	0,16	2,2	3,5	18	40	30	5°	4°	22	34	35
Шабрение	0,63	2,2	4	10	25	16	9°	6°	-	-	6
Развертывание	2,5	1,7	2	10	20	15	20°	5°	6,5	12	1,5
	1,25	1,6	2,3	30	50	40	10°	3°	12	39	6
	0,63	1,5	2,5	250	350	300	2°	2°	53	57	90
	0,32	1,4	2,8	500	500	500	1°30' ,	1°30'	90	90	300
Полирование	0,63	2,2	3	350	150	230	2°	2°	60	72	70
	0,32	1,7	3,2 5	700	300	450	1°	1°	120	105	300
	0,16	1,3	3,5	1000	450	670	30'	30'	215	180	850
Строгание	10	1,95	2,2	17	150	50	20°	2°30'	5,7	32	1,3
	5	1,9	2,5	30	250	90	15°	2°	8	50	4,5

	2,5	1,6	2,7	90	600	230	10°	1°30'	16	90	24
	1,25	1,5	2,6 5	160	450	400	6°	1°	23	120	60
Цилиндрическое фрезерование	10	1,8	1,3	10	45	20	25°	8°	4,5	14	0,5
	5	1,6	1,7	15	60	30	20°	7°	6	16	1,5
	2,5	1,5	1,8	25	80	45	15°	6°	9,5	20	4,5
	1,25	1,45	2	50	120	80	9°	4°	1,5	35	12
Точение	5	1,5	1	20	60	35	20°	10°	6	12	1,75
	2,5	1,45	1,5	30	80	50	15°	8°	8	14,5	5
	1,25	1,35	2	60	90	75	10°	7°	14	18	12
	0,63	1,3	2,1	120	120	120	5°	5°	25	24	37
Протягивание	1,25	1,75	1,2	12	9000	330	10°	12'	12	600	50
	0,63	1,7	1,8	25	12000	550	6°	10'	20	690	170
	0,32	1,65	2,2	70	15000	1000	3°	8'	48	750	650
Хонингование	0,63	2,2	1,5	4	60	15	13°	4°	9	31	5
	0,32	2,1	2,2	5,5	70	20	10°	3°	12	43	12
	0,16	2	3	14	90	35	5°	2°	26	62	45
	0,08	1,9	4	20	160	70	3°	1°30'	45	105	175
Растачивание	5	1,65	1,5	20	50	32	18°	11°	7,5	10,5	1,6
	2,5	1,6	1,6	35	65	50	13°	9°	10	13	5
	1,26	1,45	2	60	85	70	8°	7°	16	18	11
	0,63	1,4	2,5	110	120	115	5°	5°	30	25	36
Доводка цилиндрических поверхностей	0,16	2,3	1,9	25	35	30	6°	3°	25	50	35
	0,08	2,2	2	40	40	40	3°	2°30'	50	57	100
	0,04	2	2,1	70	43	55	1°	2°	110	85	275
	0,02	1,5	2,5	125	45	75	30'	1°30'	200	125	750
Доводка плоскостей	0,16	3	1,5	15	7000	300	5°	10'	25	770	400
	0,08	2,5	2,2	25	10000	500	3°	7'	47	1050	1250
	0,04	2,3	2,5	75	14000	1000	1°	5'	125	1500	5000
	0,02	2,2	3	250	35000	3000	20'	2'	275	3550	30000
Чугунные детали											
Строгание	10	2,1	2	8,5	40	18,5	35°	18°	3	9	0,45
	5	2	2,3	10	70	25	20°	10°	58	13	1,3
	2,5	1,8	4	20	500	100	10°	3°30'	11,7	58	10
	1,25	1,7	4,2	30	900	150	5°	1°30'	25	82	25
Плоское	2,5	2	2	15	250	60	27°	3°	4,7	40	6

шлифование	1,25	1,97	2,5	20	550	100	12°	1°	10,5	112	15
	0,63	1,95	3,8	35	1200	200	6°	30'	21	226	65
	0,32	1,8	4,5	40	1700	250	4°	20'	35	340	160
Цилиндрическое фрезерование	10	1,95	1,6	7	40	17	37°	11°	2,9	10,5	0,4
	5	1,9	2	8	50	20	32°	9°	3,8	13	1
	2,5	1,8	2,3	8,5	70	25	25°	7°	48	18	2,5
	1,25	1,65	2,5	13	180	50	15°	3°	8,5	45	8
Торцовое фрезерование	10	—	—	13	45	25	35°	9°	3,3	13,5	0,6
	5	1,5	1,1	20	75	40	20°	6°	8	19,5	2
	2,5	1,4	1,4	30	110	60	10°	3°	12	39	6
	1,25	1,35	1,5	45	170	90	5°	2°	22	69	15
Внутреннее шлифование	2,5	2,2	2,5	7	19	12	33°	18°	3,7	6,7	1,2
	1,25	2,1	2,8	12	22	16	18°	13°	7	10	2,5
	0,63	1,9	3,5	20	34	25	3°30'	7°	18	18	8
	0,32	1,85	3,7 5	35	57	45	3°	3°	40	45	30
Точение	10	1,9	1,1	15	40	25	30°	11°	3,8	10,5	0,6
	5	1,8	1,3	20	70	37,5	20°	8°	7	14,5	1,3
	2,5	1,7	2	30	120	60	10°	5°	12	18	2,5
	1,25	1,7	2,5	60	270	130	5°	3°	30	42	6
Растачивание	5	2	2	10	13	12	30°	20°	4	6	0,6
	2,5	1,9	2,7	12	14	13	25°	13°	5	9	1,3
	1,25	1,8	2,9	15	16	15	20°	10°	7	11	2,5
	0,63	1,75	2,5	20	20	20	10°	4°30'	12	19	6
Круглое шлифование	2,5	1,9	1,5	13	200	50	18°	4°	6,6	31	5
	1,25	1,75	2,5	18	400	85	12°	2°	10	60	13,5
	0,63	1,7	2,7 5	23	1000	150	8°	1°	16	178	50
	0,32	1,6	3	25	1400	190	6°	30'	22	235	120
Доводка цилиндрических поверхностей	0,16	1,3	2	25	8	15	4°	7°	33	18,5	17,5
	0,08	1,2	2,3	35	13	20	3°	4°	50	32	55
	0,04	1,1	2,4	50	30	40	1°30'	2°	85	80	200
	0,02	1,05	3	70	45	55	50'	1°	230	145	550
Шабрение	0,63	2	1,8 5	10	35	18,5	9°	4°	-	-	10

Примечание. Параметры  $b$  и  $v$  относительной опорной длины профиля  $t_p$  входят в зависимость  $t_p = b(p/R_{\max})^v$  при  $0 \leq p/R_{\max} \leq 0,4$ ;  $r_{\text{пр}}$ ,  $r_{\text{п}}$  – радиусы закругления

вершин микронеровностей соответственно в продольном и поперечном направлениях;  $\beta_{пр}$ ,  $\beta_{п}$  – углы профиля микронеровностей соответственно в продольном и поперечном направлениях.

## Приложение Г

### Параметры шероховатости при различных методах обработки

Обработка	Формула	Условия обработки
<b>Наружные поверхности</b>		
Точение: получистовое, чистовое	$R_a = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}}$	$s = 0,05 \div 0,43$ мм/об; $v = 71 \div 282$ м/мин; $p = 0,5 \div 2$ мм; $\gamma = +4^\circ \div (-40^\circ)$ . Коэффициенты $k_0 - k_4$ приведены в табл. 6 [24]
тонкое (алмазное)	$R_a = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}} ;$ $R_p = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}} ;$ $S_m = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}} ;$ $t_p = 50 \left( \frac{0,005 R_a p}{R_p} \right)^{\left( \frac{R_p}{R_a} - 1 \right)}$	$s = 0,05 \div 0,5$ мм/об; $v = 50 \div 150$ м/мин; $p = 0,5 \div 2$ мм; $\gamma = +4^\circ \div (-40^\circ)$ . Коэффициенты $k_0 - k_4$ приведены в табл. 7 [24]
Шлифование: круглое предварительное и получистовое	$R_a = 0,47 \frac{s_{np}^{0,35} i^{0,29} K^{0,08} j_{cm}^{0,34}}{v_d^{0,06} s_{pad}^{0,03} i^{0,024}} ;$ $R_p = 1,08 \frac{s_{np}^{0,16} s_{pad}^{0,03} i^{0,008} H^{0,7} K^{0,03}}{v_d^{0,18}} \left( \frac{j_{cm}}{10} \right)^{0,24} ;$ $S_m = 0,017 \frac{s_{np}^{0,34} i^{0,04} H^{0,25} K^{0,055}}{v_d^{0,22} s_{pad}^{0,15}} \left( \frac{j_{cm}}{10} \right)^{0,13}$	Обрабатываемый материал – сталь 40Х, HRC 30-35; $v_d = 20 \div 50$ м/мин; $s_{np} = (0,5 \div 1)$ В, $s_{pad} = 0,05 \div 0,1$ мм/дв. ход; $i = 1 \div 5$ , $K = 16 \div 40$ , для связки С2 Н = 2; для СМ1 Н = 1; $i_{ст} = 10000 \div 30000$ Н/мм
тонкое (торцом чашечного алмазного круга)	$R_a = 0,03 s_{np}^{0,45} K^{0,85} \left( \frac{P}{10} \right)^{0,27} ;$	$s_{np} = 0,15 \div 1,5$ мм/об; $K = 28/20 \div 125/100$ ; $P = 20 \div 140$ Н

	$R_p = 0,02 s_{np} K^{0,6} \left( \frac{P}{10} \right)^{0,2}$	
Суперфиниширование(алмазные брусками)	$R_a = 0,0003 \left( \frac{P}{10^5} \right)^{0,15} \frac{K^{1,7}}{v_d^{0,2} \tau^{0,35}};$ $R_p = 0,0006 \left( \frac{P}{10^5} \right)^{0,17} \frac{K^{1,8}}{v_d^{0,2} \tau^{0,35}}$	<p><math>p = (3 \div 13) 10^5</math> Па; <math>v_d = 10 \div 50</math> м/мин; <math>\tau = 10 \div 80</math> с.</p> <p>Параметры шероховатости приведены в табл. 8 [24]</p>
Полирование лентами: «конечной» длины	$R_a(R_z, R_p) = k_0 \frac{Ra_{уск}^{k_1} K^{k_2} (10^5)^{k_4}}{p^{k_4} v_d^{k_4} \tau^{k_4}};$ $S_m = 1/(k_0 + k_1 Ra_{уск} + k_2 K + k_3 \frac{P}{10^5} + k_4 v_d + k_5 \tau)$	<p><math>Ra_{исх} = 0,32 \div 0,80</math> мкм; <math>K = 63/50 \div 80/63</math>; <math>p = (1 \div 6) 10^5</math> Па; <math>v_d = 9,4 \div 36,4</math> м/мин; <math>\tau = 25 \div 60</math> с, коэффициенты <math>k_0 - k_5</math> приведены в табл. 9 [24]</p>
«бесконечной» длины	$R_a = 0,004 \left( \frac{P}{10} \right)^{0,46} \frac{K^{1,26}}{\tau^{0,61}};$ $R_p = 0,013 \left( \frac{P}{10} \right)^{0,25} \frac{K^{1,15}}{\tau^{0,47}};$ $R_{max} = 0,026 \left( \frac{P}{10} \right)^{0,34} \frac{K^{1,33}}{\tau^{0,62}}$	<p><math>K = 40/28 \div 125/100</math>; <math>P = 20 \div 70</math> Н; <math>\tau = 10 \div 70</math> с.</p> <p>Параметры шероховатости приведены в табл. 10 [24]</p>
Притирка	$R_a = 0,4 \frac{Ra_{уск}^{0,36} K^{0,79} v^{0,1}}{a^{0,2} \tau^{0,27}};$ $R_z = 1,13 \frac{Ra_{уск}^{0,32} K^{0,74} v^{0,06}}{a^{0,11} \tau^{0,35}};$ $R_p = 0,08 \frac{Ra_{уск}^{0,22} K^{0,72} v^{0,15} a^{0,06}}{\tau^{0,15}};$ $S = 0,069 \frac{v^{0,19}}{K^{0,42} a^{0,07} \tau^{0,2}}$	<p>Обрабатываемый материал – сталь У10А, HRC 60-65; <math>Ra_{исх} = 0,17 \div 0,89</math> мкм; <math>v_d = 40 \div 150</math> м/мин; <math>K = \text{АСМ } 2/3</math>; АСМ 10/7; <math>\tau = 120 \div 300</math> с; <math>\alpha = 10 \div 25^\circ</math></p>
Обкатывание роликами	$R_a(v, b) = k_0 v^{k_1} s^{k_2} p^{k_3} \gamma^{k_4} p_p^{k_5} P^{k_6} D^{k_7} s_n^{k_8} v_n^{k_9}$	<p>Коэффициенты <math>k_0 - k_9</math> приведены в табл. 11 [24]</p>
шариками	$R_a = Rz_{уск}^{0,95} \sigma_{max}^{-0,24} D^{-0,13} s^{0,14} v^{0,04};$ $v = 0,21 v_{уск}^{4,8} \sigma_{max}^{-0,03} D^{-0,03} s^{0,03} v^{0,02};$	<p>Обрабатываемый материал – сталь ШХ15, HRC 62÷63; <math>D = 3 \div</math></p>

	$b = 0,24 \nu_{\text{исх}}^{0,61} \sigma_{\text{max}}^{0,28} D^{0,3} s^{-0,18} \nu^{-0,03}$	5 мм; s= 0,03 ÷ 0,11
Алмазное выглаживание	$R_a = 1,1 R_z^{0,77} \sigma_{\text{max}}^{-0,27} D^{-0,3} s^{0,14} \nu^{0,05}$ ; $\nu = 0,58 \nu_{\text{исх}}^{2,6} \sigma_{\text{max}}^{-0,04} D^{-0,04} s^{0,04} \nu^{0,01}$ ; $b = 0,10 b_{\text{исх}}^{0,68} \sigma_{\text{max}}^{0,36} D^{0,32} s^{-0,16} \nu^{-0,02}$	мм/об; v=10÷70 м/мин $\sigma_{\text{max}} = (5000 \div 9000)$ МПа
Электрохимическая : для предварительно обточенных поверхностей ( $R_{\text{исх}} = 1,5 \div 6,2$ мкм)	$R_a = 0,006 R_{a_{\text{исх}}}^{1,03} I^{-0,03} \left( \frac{P}{10} \right)^{-0,4} \nu^{0,37} s^{0,35} p_p^{0,36} \times$ $\times (tg \varphi)^{1,03}$ ; $R_p = 0,026 R_{a_{\text{исх}}}^{0,98} I^{-0,04} \left( \frac{P}{10} \right)^{-0,34} \nu^{0,25} s^{0,41} p_p^{0,41} \times$ $\times (tg \varphi)^{0,88}$	Обрабатываемый материал – сталь 45; I = 1÷500 А; φ = 0,3÷0,7°; P=300÷800 Н; радиус закругления ролика $p_p = 0,5 \div 1,5$ мм; s = 0,07÷0,15 мм/об
для предварительно шлифованных поверхностей ( $R_{\text{исх}} = 0,35 \div 0,16$ мкм)	$R_a = 0,18 R_{a_{\text{исх}}}^{1,22} I^{-0,03} \left( \frac{P}{10} \right)^{-0,41} \nu^{0,36} s^{0,29} p_p^{0,2} \times$ $\times (tg \varphi)^{-0,28}$ $R_p = 0,21 R_{a_{\text{исх}}}^{0,96} I^{-0,03} \left( \frac{P}{10} \right)^{-0,37} \nu^{0,35} s^{0,3} p_p^{0,3} \times$ $\times (tg \varphi)^{-0,35}$	То же
Магнитно-абразивная	$R_a = 0,58 \frac{R_{a_{\text{исх}}}^{0,55} K^{0,15} \delta^{0,3}}{\tau^{0,52} B_1^{0,05} v^{0,08} v_0^{0,26}}$ ; $R_p = 1,08 \frac{R_{a_{\text{исх}}} K^{0,23} \delta^{0,05}}{\tau^{0,39} B_1^{0,05} v^{0,21} v_0^{0,13}}$	$\delta = 0,8 \div 2$ мм; $B_1 = 0,3 \div 1,1$ Тл; $v_0 = 3 \div 9$ м/мин
<b>Внутренние поверхности вращения</b>		
Сверление	$R_a = 6,36 d^{0,25} v^{0,12} s^{0,41}$ ; $R_p = 52,4 \frac{d^{0,17} s^{0,52}}{v^{0,14}}$ ; $R_z = 48,7 \frac{d^{0,17} s^{0,46}}{v^{0,04}}$ ; $R_{\text{max}} = 61,3 d^{0,17} v^{0,02} s^{0,46}$ ; $Sm = 233,9 d^{0,23} v^{0,32} s^{0,62}$	Обрабатываемый материал – сталь 40Х; d=12÷25 мм; v= 12÷20 м/мин; s = 0,06÷0,14 мм/об

Зенкерование	$Ra = 5,6 \frac{v^{0,16} s^{0,76}}{d^{0,23}} ;$ $R_p = 254,8 \frac{s^{0,53}}{d^{0,52} v^{0,51}} ;$ $Rz = 458 \frac{s^{0,41}}{d^{0,64} v^{0,5}} ;$ $R_{\max} = 98,4 \frac{s^{0,55}}{d^{0,47} v^{0,1}} ;$ $Sm = 1539 \frac{s^{0,85}}{d^{0,02} v^{0,22}}$	Обрабатываемый материал – сталь 40X; d=12÷25 мм; v=25÷40 м/мин; s = 0,3÷0,6 мм/об
Развертывание	$Ra = 0,1 \frac{d^{0,26} v^{0,89}}{s^{0,27}} ;$ $R_p = 0,85 \frac{d^{0,19} v^{0,36}}{s^{0,18}} ;$ $Rz = 1,82 \frac{d^{0,04} v^{0,4}}{s^{0,1}} ;$ $R_{\max} = 2,5 \frac{d^{0,02} v^{0,33}}{s^{0,2}} ;$ $Sm = 403,5 \frac{v^{0,13}}{d^{0,02} s^{0,4}}$	Обрабатываемый материал – сталь 40X; d=12÷25 мм; v=5÷10 м/мин; s = 0,6÷1,6 мм/об
Растачивание получистовое и чистовое	$Ra = 76,2 \frac{s^{0,57} v^{0,03} j_{\text{ср}}^{0,04}}{10^{0,04} i^{0,08} p^{0,2} \alpha^{0,34} (50 + \gamma)^{0,35}} ;$ $R_p = 228,18 \frac{s^{0,65} j_{\text{ср}}^{0,05}}{10^{0,05} i^{0,02} p^{0,16} \alpha^{0,52} (50 + \gamma)^{0,23}} ;$ $Sm = 0,006 \frac{v^{0,03} s^{0,46} p^{0,12} (50 + \gamma)^{1,05}}{\alpha^{0,19}}$	Обрабатываемый материал – сталь 40X; t=0,15÷1 мм; v=50÷150 м/мин; s = 0,05÷0,5 мм/об; p=0,5÷2 мм; γ=+4÷(–40°); α=3÷7°; j <sub>ср</sub> =10000÷40000 Н/мм
Шлифование чистовое	$Ra = 92,5 \frac{s_{\text{пр}}^{0,39} s_{\text{рад}}^{0,05} i^{0,012} K^{0,06}}{v^{0,23} H^{0,04} i_{\text{ср}}^{0,98}} ;$ $R_p = 766 \frac{s_{\text{пр}}^{0,28} s_{\text{рад}}^{0,11}}{v^{0,16} i^{0,06} H^{0,53} K^{0,08} j_{\text{ср}}^{1,16}} ;$ $Sm = 0,002 \frac{v^{0,27} s_{\text{рад}}^{0,08} i^{0,29} H^{0,19} K^{0,62}}{s_{\text{пр}}^{0,02} j_{\text{ср}}^{0,33}}$	Обрабатываемый материал – сталь 40X; v=20÷50 м/мин; s <sub>пр</sub> = (0,5÷1) В; s <sub>рад</sub> = 0,05÷0,1 мм/дв. ход; i=1÷5; H = СТ2-5, МЗ-3; К-16÷40; j <sub>ср</sub> = 8000÷30000 Н/мм

Хонингование	$Ra = 0,028 \frac{\tau_1^{0,16} \rho_1^{0,03} p_2^{0,24} f^{0,4} A^{0,09}}{10^{1,35} v_1^{0,04} v_2^{0,33} \tau_2^{0,11}};$ $R_p = 0,024 \frac{\tau_1^{0,19} \tau_2^{0,04} p_1^{0,04} p_2^{0,34} f^{0,43} A^{0,08}}{10^{1,9} v_1^{0,03} v_2^{0,23}};$ $Sm = 0,017 \frac{\tau_1^{0,1} p_2^{0,16} f^{0,37} A^{0,3}}{v_2^{0,36} \tau_2^{0,17} 10^{0,8}}$	<p>Обрабатываемый материал – сталь ШХ15; Ra<sub>исх</sub> = 0,5 мкм. Обработка брусками из электрокорунда зернистостью 50/40 на керамической связке; СОТС – на основе керосина; v<sub>1</sub> = 26 ÷ 75 м/мин; v<sub>2</sub> = 50 ÷ 150 м/мин; p<sub>1</sub> = (5 ÷ 15) 10<sup>5</sup> Па; p<sub>2</sub> = (3 ÷ 10) 10<sup>5</sup> Па; f = 1300 ÷ 1900 мин<sup>-1</sup>; A = 1 ÷ 2 мм; τ = 5 ÷ 10 с.</p>
<b>Плоские поверхности</b>		
Торцовое фрезерование чистовое	$Ra = 4,83 \frac{s_z^{1,69} t^{0,15}}{v^{1,23} \rho^{0,14} \gamma^{0,46}};$ $R_p = 87,3 \frac{s_z^{1,15}}{v^{1,27} \rho^{0,24} \gamma^{0,62}}$	<p>Обрабатываемый материал - сталь ШХ15; S<sub>z</sub> = 0,08 ÷ 0,5 мм/зуб; t = 0,3 ÷ 1,8 мм; v = 18 ÷ 44 м/мин; p = 0,5 ÷ 2 мм; γ = 5 ÷ 20°</p>
Строгание чистовое	$Ra = 37,3 \frac{s^{1,93} \gamma^{0,27}}{v^{0,11} t^{0,12} \rho^{0,8}};$ $R_p = 131,42 \frac{s^2 \gamma^{0,15}}{v^{0,13} t^{0,29} \rho^{0,8}}$	<p>Обрабатываемый материал – сталь ШХ15; s = 0,25 ÷ 0,5 мм/дв. ход; v = 5,6 ÷ 22 м/мин; остальные параметры (t, p, γ) — как и при фрезеровании</p>
Торцовое точение	$Ra = 10,88 \frac{s^{1,69} \gamma^{0,59}}{\rho^{0,3}};$ $R_p = 58,8 \frac{s^{1,49} \gamma^{0,36}}{\rho^{0,35}}$	<p>Обрабатываемый материал – сталь ШХ15; s = 0,1 ÷ 0,5 мм/об; γ и p — как и при фрезеровании</p>
Шлифование чистовое	$Ra = 0,27 \frac{K^{0,48} v^{0,27} s^{0,8} t^{0,13}}{l^{0,11}};$ $R_p = 2,28 \frac{K^{0,29} v^{0,2} s^{0,32} t^{0,12}}{l^{0,13}}$	<p>Обрабатываемый материал – сталь 12ХН3А; v = 0,21 ÷ 0,37 м/с; S<sub>поп</sub> = 3 ÷ 6 мм/ход, t =</p>

		0,01÷0,04 мм; i=1÷5; K 46-100
Шлифование отделочное	$y_i = Ra(R_p, Sm) = H^c k_0 K^{k_1} v^{k_2} s^{k_3} t^{k_4}$	Обрабатываемый материал и значения коэффициентов c, k <sub>0</sub> -k <sub>4</sub> для алмазных и абразивных кругов приведены в табл. 13 [24]. Для связки C2 H=2; для CM2 H=1
Накатывание шариковыми головками	$Ra = k_0 \frac{Ra_{исх}^{k_1} s_{пр}^{k_2} 10^{K_2}}{p^{k_3} i^{k_4} v^{k_5}}$ $R_p = k_0 \frac{R_{p\text{исх}}^{k_1} s_{пр}^{k_2} 10^{K_2}}{p^{k_3} i^{k_4} v^{k_5}}$	s <sub>пр</sub> = 13 ÷ 42 мм в 1 мин. На один деформирующий элемент; p=200÷600 МПа; i=1÷3; при D = 90 мм v = 14 ÷ 70 м/мин. Значения k <sub>0</sub> - k <sub>5</sub> приведены в табл. 14 [24]
Вибронакатывание	$Ra = k_0 \frac{Ra_{исх}^{k_1} s_{пр}^{k_2}}{p^{k_3} i^{k_4}}$ $R_p = k_0 \frac{R_{p\text{исх}}^{k_1} s_{пр}^{k_2}}{p^{k_3} i^{k_4}}$	Значения коэффициентов k <sub>0</sub> -k <sub>4</sub> при обработке различных материалов приведены в табл. 15 [24].
<p>Обозначения: s – подача; v – скорость резания; p – радиус при вершине резца; γ – передний угол; В – ширина круга; s<sub>рад</sub> – радиальная подача; i – число выхаживаний; К – зернистость круга; Н – твердость круга; j<sub>ст</sub> – жесткость станка; s<sub>пр</sub> – продольная подача; Р – сила прижима; p – давление бруска; v<sub>д</sub> – скорость вращения детали; τ – время обработки; Ra<sub>исх</sub> – исходная шероховатость; α<sub>1</sub> – угол атаки; D – диаметр шарика; σ – давление в контакте; I – сила тока; δ – зазор между полюсниками и деталью; В<sub>1</sub> – магнитная индукция; p<sub>p</sub> – радиус закругления ролика; t – глубина резания; α – задний угол; v<sub>1</sub> и v<sub>2</sub> – скорости вращательного движения при черновом и чистовом хонинговании соответственно; p<sub>1</sub> и p<sub>2</sub> – давление брусков при черновом и чистовом хонинговании соответственно; f – частота колебаний инструмента; А – амплитуда колебаний; φ - задний угол вдавливания.</p>		

### Параметры поперечной волнистости

Метод обработки	Wz, мкм	Sw, мкм	Sw/Wz	Sn/Rz	rw <sub>н</sub> , мм
Шлифование: внутреннее	0,6-4,5	500-1400	100-1350	3,4-24	10-80
	1-3	450-1400	120-450	3,5-18	5-400
круглое	0,75-3	250-500	165-400	4,8-24	10-25
	0,5-7,5	550-1000	80-1850	6,5-22	10-100
плоское	1,25-13	750-1400	100-700	3-20	15-50
	0,8-4	500-900	200-800	4,5-35	20-80
Растачивание	2-3,5	1000-1500	300-750	7,5-730	15-55
	0,5-10	400-1000	40-850	4-13	5-50
Строгание	2-6	400-1700	200-350	5,7-25	10-30
	-	-	-	-	-
Хонингование	0,1-0,8	150-700	200-7000	9-45	2,5-40
	-	-	-	-	-
Развертывание	0,5-4	300-500	100-1000	6,5-90	5-50
	-	-	-	-	-
Полирование	0,3-1,5	150-350	200-500	60-220	10-25
	-	-	-	-	-
Доводка поверхностей: плоских	0,1-0,35	60-100	300-600	45-125	5-10
	-	-	-	-	-
цилиндрических	0,05-0,15	35-120	400-700	25-200	2,5-10
	-	-	-	-	-
Растачивание	-	-	-	-	-
	0,5-10	400-1000	40-850	4-13	5-50
Торцовое фрезерование	-	-	-	-	-
	2,5	800	300	22	85
Точение	-	-	-	-	-
	1	1000	1000	30	50

Примечание. В числителе приведены параметры, полученные при обработке стальных деталей, в знаменателе - при обработке чугуновых деталей.

### Приложение Е

#### Параметры продольной волнистости

Вид обработки	Wz <sub>пр</sub> , мкм	Sw <sub>пр</sub> , мм	Sw <sub>пр</sub> /Wz <sub>пр</sub>	S <sub>пр</sub> /R <sub>пр</sub>	rw <sub>пр</sub> , мм
Плоское шлифование	1,2-12	2,4-3,5	280-2900	60-800	30-350

	1,3-9	1,8-2,3	200- 1770	42-340	40-200
Строгание	1-12	1-5	320-1000	30-128	40-100
	12	1,65	140	9,5	20
Цилиндрическое фрезерование	7,5-40	1,7-3,4	60-270	14,5-20	5-45
	7,5-30	1,6-2,5	83-267	10,5-45	10-60
Протягивание	0,4-3	0,7-0,9	300-1750	12-50	20-80
	-	-	-	-	-
Доводка плоских поверхностей	0,25-0,5	1-1,5	2000-6000	750-1000	150-850
	-	-	-	-	-

Примечание. В числителе приведены данные, полученные при обработке стальных деталей, в знаменателе — при обработке чугунных деталей

#### Приложение Ж

##### Влияние видов обработки на физические свойства поверхности слоев

Вид обработки	Степень наклепа = $(H_{\text{поверхности}}/H_{\text{середины)}) \cdot 100\%$	Глубина наклепа, мкм
Точение:		
обычное и скоростное	120—150	30-50
тонкое	140-180	20-60
Фрезерование:		
торцовое	140-160	40-100
цилиндрическое	120-140	40-80
Сверление и зенкерование	160-170	180-200
Развертывание	—	150-200
Протягивание	150-200	20-75
Зубофрезерование и зубодолбление	160-200	120-150
Шевингование зубьев	—	До 100
Шлифование:		
круглое деталей из сталей:		
незакаленной углеродистой	140-160	30-60
низкоуглеродистой	160-200	30-60
закаленной	125-130	20-40
плоское	150	16-35

