



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра технологии машиностроения

Максим Сергеевич Махалов

# **СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ПРОЦЕССЫ РЕННОВАЦИИ МАШИН**

**Электронное учебное пособие**

Кемерово 2016

© КузГТУ, 2016  
© М. С. Махалов, 2016

[Вперед](#) →

Рецензент(ы) Клепцов А. А. – заведующий кафедрой технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»  
Кречетов А. А. – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Махалов М. С.

**Способы восстановления деталей и процессы реновации машин:** учебное пособие [Электронный ресурс] для студентов направлений подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и 15.03.01 «Машиностроение» / М. С. Махалов; КузГТУ. – Электрон. дан. – Кемерово, 2016. – 1 оптический диск (2,3 Мб).

Разработано по дисциплине «Прогрессивные технологии упрочнения и восстановления деталей машин».

В учебном пособии определена роль и показаны научные подходы к проблеме технологического обеспечения качества поверхностного слоя и обеспечения долговечности деталей машин. Приведены описания жизненного цикла изделий машиностроения, дана характеристика методов ремонта машин и производства по восстановлению деталей и его места в технологии ремонта машин. Рассмотрены современные способы восстановления и упрочнения деталей машин и оборудования.

### Текстовое (символьное) электронное издание

Минимальные системные требования:

Частота процессора не менее 1,0 ГГц; ОЗУ 512 Мб; 20 Гб HDD; операционная система WindowsXP; CD-ROM 4-скоростной; ПО для чтения файлов DOC-формата; SVGA-совместимая видеокарта; мышь.

© КузГТУ, 2016

© М. С. Махалов, 2016

[Вперед](#) →

Сведения о программном обеспечении, которое использовано для создания электронного издания	MSWord
Сведения о технической подготовке материалов для электронного издания	Редактор      З. М. Савина
Объем издания в единицах измерения объема носителя, занятого цифровой информацией (байт, Кб, Мб)	2,3 мегабайта
Комплектация издания (количество носителей, наличие сопроводительной документации)	1 CD-диск, без сопроводительной документации
Наименование и контактные данные юридического лица, осуществившего запись на материальный носитель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28 Тел./факс: 8(3842) 58-35-84

[Вперед→](#)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1.</b>	<b>1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ</b>	<b>5</b>
1.1.	Термины и определения	5
1.2.	Типы и организационные формы производства	10
<b>2.</b>	<b>ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ</b>	<b>12</b>
<b>3.</b>	<b>ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАЗРУШЕНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b>	<b>19</b>
<b>4.</b>	<b>РЕМОНТ МАШИН</b>	<b>24</b>
4.1.	Определение понятий «ремонт» машин, «восстановление» и «упрочнение» деталей	24
4.2.	Виды и методы ремонта	25
<b>5.</b>	<b>ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОИЗВОДСТВА И СОДЕРЖАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ</b>	<b>28</b>
5.1.	Состояния детали	28
5.2.	Структура процесса восстановления деталей	30
5.3.	Определение восстановительного производства, его цель и задачи	32
5.4.	Отличительные признаки и особенности восстановительного производства	32
5.5.	Структура восстановительного производства	34
<b>6.</b>	<b>ЗАДАЧИ И ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОЦЕССАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ</b>	<b>35</b>
<b>7.</b>	<b>КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН (СОЗДАНИЯ РЕМОНТНЫХ ЗАГОТОВОК)</b>	<b>36</b>
<b>8.</b>	<b>ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СЛЕСАРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ</b>	<b>38</b>
8.1.	Восстановление деталей механической обработкой в ремонтный размер	38
8.2.	Восстановление деталей постановкой дополнительного элемента (дополнительных ремонтных деталей)	40
<b>9.</b>	<b>ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ</b>	<b>43</b>
9.1.	Способы восстановления деталей объемным пластическим деформированием	43
9.2.	Способы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД)	51
<b>10.</b>	<b>ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ НАНЕСЕНИЕМ МАТЕРИАЛА</b>	<b>61</b>
10.1.	Восстановление деталей методами сварки и наплавки	61
10.2.	Подготовка материалов и заготовок к наплавке	62
10.3.	Способы восстановления деталей методами сварки и наплавки	62
10.4.	Восстановление деталей напылением материала	79
10.5.	Способы восстановления деталей напылением материала	80

10.6.	Восстановление деталей методами пайки	85
10.7.	Восстановление деталей с помощью электрохимических покрытий	86
10.8.	Способы восстановления деталей с помощью электрохимических покрытий	90
10.9.	Использование полимеров для восстановления деталей	101
	<b>КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ</b>	<b>107</b>
	<b>СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>109</b>

# 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

## 1.1. Термины и определения

**Изделием** в машиностроении является предмет производства, подлежащий изготовлению. Машиностроительным изделием может быть как машина в целом, так и сборочная единица любого порядка, деталь и заготовка.

**Машиной** называется устройство, выполняющее механические движения на основе мехатронного, физического или химического преобразования энергии, в целях замены или облегчения физического и умственного труда человека, повышения производительности и качества продукции.

**Сборочная единица** – это изделие, составные части которого подлежат соединению. Сборочная единица в зависимости от конструкции может состоять из отдельных деталей либо включать сборочные единицы более высоких порядков и детали. Сборочная единица 1-го порядка входит непосредственно в машину, и состоит либо из отдельных деталей, либо из одной или нескольких сборочных единиц 2-го порядка и деталей. Сборочную единицу 2-го порядка составляют сборочные единицы 3-го порядка и детали и т. д. Сборочная единица наивысшего порядка включает в себя только отдельные детали.

**Деталью** называется неразъемное изделие, изготовленное без применения сборочных операций.

**Заготовка** – это изделие, из которого изменением формы, размеров, точности и качества поверхностных слоев, возможно и физико-механических свойств материала, изготавливают деталь. Технологическая структура изделий машиностроения представлена на рис. 1. Она включает в себя производство заготовок, изготовление деталей, сборку и испытание готовых изделий.

**Жизненный цикл** машиностроительного изделия схематично представлен на рис. 2.

Вначале предприятие изучает рынок спроса на изделие на момент его производства и его потребительские свойства, затем осуществляет в короткий срок научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы и проектирование конкурентоспособного изделия. Практически в это же время проводятся конструкторско-технологическая подготовка производства, изготовление опытного изделия, его испытание и научные работы с целью совершенствования опытного образца. Параллельно с этим, по завершении подготовки производства, начинается серийный выпуск изделия.

В процессе эксплуатации изделия осуществляются его техническое обслуживание и текущий ремонт, затем капитальный ремонт и частичная утилизация. По достижении изделием своего морального или физического старения, а лучше, если они совпадают, проводится полная утилизация изделия, и оно прекращает свою «жизнь».

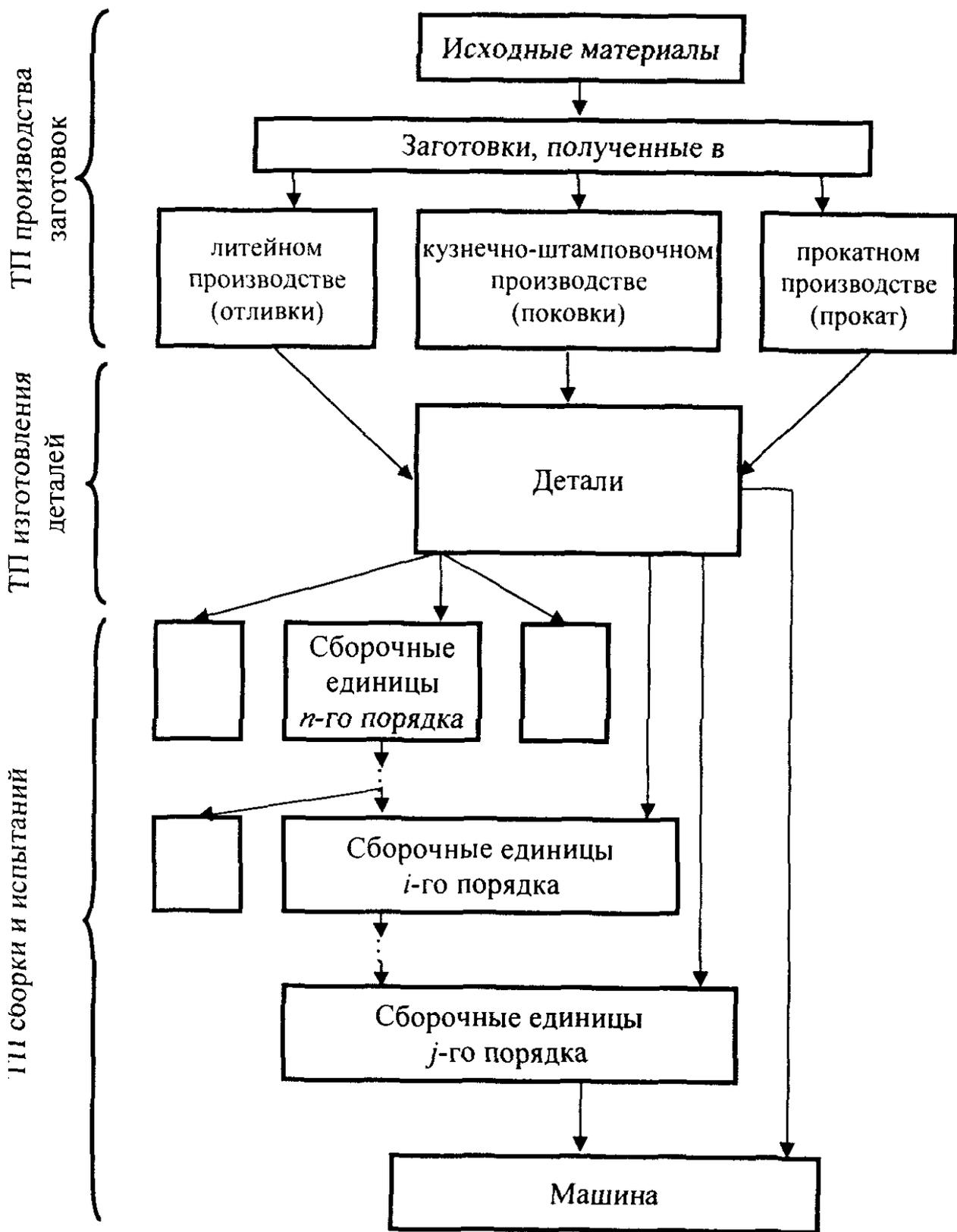


Рис. 1. Технологическая структура машиностроительных изделий:  
 ТП – технологическая подготовка

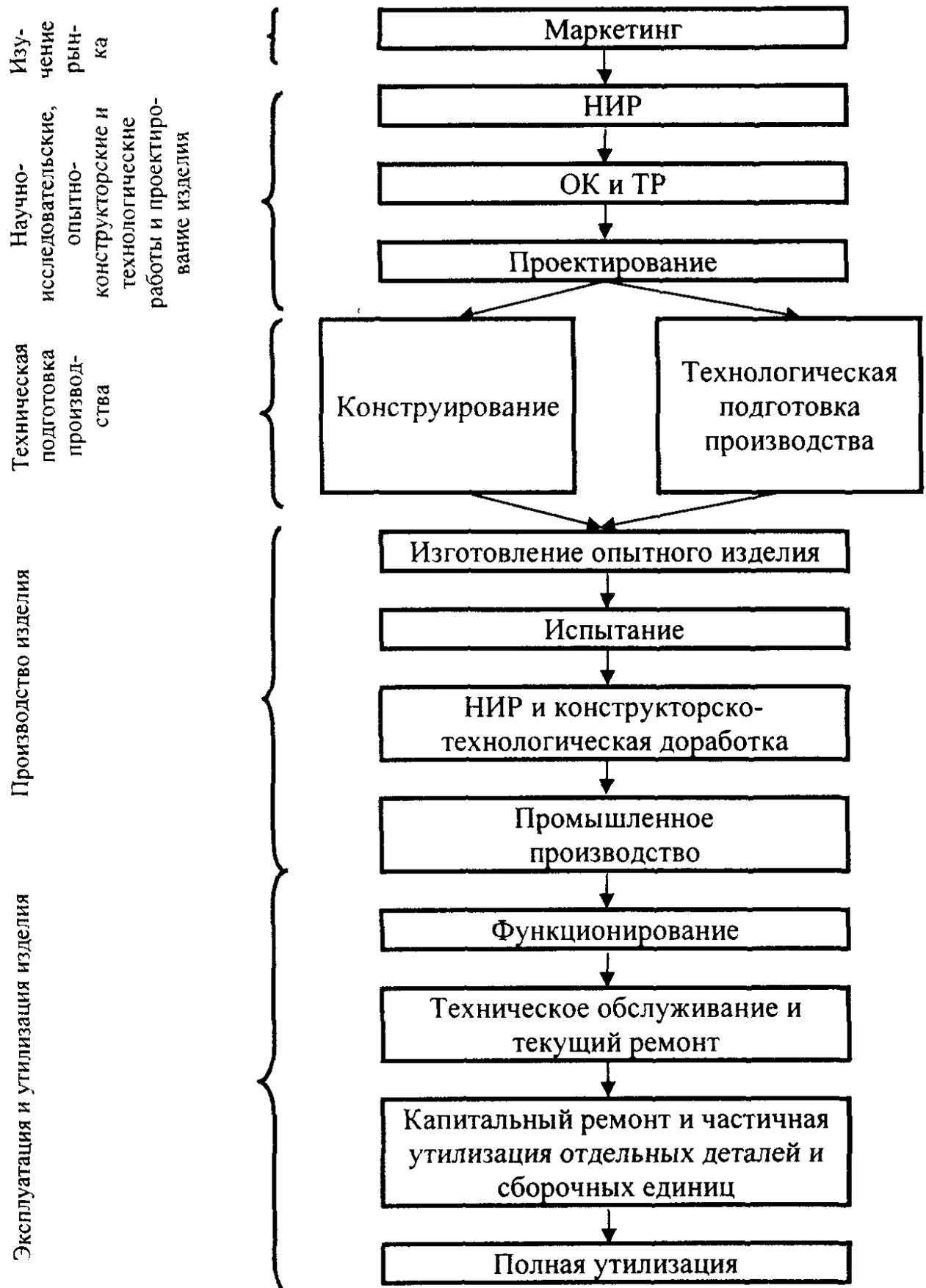


Рис. 2. ЖЦ машиностроительных изделий

Значительное место в жизненном цикле изделия, а именно в его становлении, принадлежит технологии машиностроения. Причем, чем раньше в этом цикле будут задействованы технологи, тем выше эффективность и конкурентоспособность изделий машиностроения. Еще на предварительной стадии маркетинга и проработки технологи могут оценить конкурентоспособность технологического процесса, для которого предполагается выпуск проектируемого изделия. Проведение НИР и опытно-конструкторских работ без учета технологических аспектов практически неэффективно, так как себестоимость, а, следовательно, и конкурентоспособность изделий в значительной мере определяются их технологической себестоимостью. Поэтому на ранних стадиях проектирования изделий должна проводиться тщательная проработка их технологичности.

Под **технологичностью конструкции изделия** понимают совокупность его свойств, определяющих приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

Важная роль в жизненном цикле изделий отводится **технической подготовке производства**, которая включает в себя:

1) **конструкторскую подготовку производства (КПП)** – разработку конструкции изделия и создание его сборочных чертежей, рабочих чертежей деталей, запускаемых в производство, с оформлением соответствующих спецификаций и другой конструкторской документации;

2) **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;

3) **календарное планирование** производственного процесса изготовления изделий в установленные сроки при заданных объеме выпуска и затратах.

**Технологическим процессом** называют часть производственного процесса, содержащую целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда (изделия). При изготовлении заготовок производятся целенаправленные действия по превращению материала в заготовки. В процессе термической обработки осуществляются структурные изменения в материалах заготовок. При изготовлении деталей производится последовательное изменение геометрических форм, размеров, точности и качества поверхностного слоя. ТП сборки связан с изменением взаимного положения собираемых деталей путем их соединения.

Измерение – тоже технологический процесс, поскольку при этом происходит определение состояния изделия.

Существенным является тот факт, что эти действия должны быть целенаправленными. В этой связи хранение деталей или заготовок на складе не является технологическим процессом, даже если происходит изменение их состояния (например, они ржавеют), поскольку эти изменения не вызваны целенаправленными действиями.

Для выполнения технологического процесса должны быть организованы рабочие места.

*Рабочее место* – это часть объема цеха, предназначенная для выполнения работы одним рабочим или группой рабочих (бригадой), в которой (в этой части объема цеха) помещены технологическое оборудование, средства механизации и автоматизации технологических процессов (подъемно-транспортное оборудование, часть конвейера и др.) и, на ограниченное время, технологическая оснастка и предметы труда.

Технологический процесс, как правило, делится на несколько частей. Существует две причины такого деления:

1. Физическая причина – технически сложно или невозможно создать оборудование, способное на одном рабочем месте полностью обработать деталь;

2. Экономическая причина – даже если появятся технические возможности создания такого оборудования, это будет экономически нецелесообразно, поскольку такой станок будет очень дорого стоить. Поэтому любой технологический процесс делится на технологические операции.

Основной составляющей ТП является технологическая операция.

**Технологическая операция** – это законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. Технологическая операция может состоять из одного или нескольких технологических переходов.

**Технологическим переходом** называется законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах. Технологический переход может осуществляться за один или несколько рабочих ходов.

При механической обработке технологический переход – часть операции по обработке одной поверхности одним инструментом и на одном рабочем месте. При сборке – это присоединение одной детали к другой с требуемой точностью.

Под **рабочим ходом** понимается законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменениями формы, размеров, качества поверхности или свойств заготовки.

При выполнении технологической операции часто необходимо переадресовать и изменять положение заготовки относительно рабочих органов станка или инструмента. Для этого введены понятия «установ» и «позиция».

**Установ** – часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемой заготовки или сборочной единицы.

**Позиция** – фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижных частей оборудования.

Деталь однократно устанавливается на позиции «установка» (рис.3). Далее деталь вместе с приспособлением или столом станка переводится во вторую позицию I, на которой производится сверление отверстия, затем в третью пози-

цию II, где производится зенкерование отверстия, и далее в четвертую позицию III, производящую развертывание отверстия.

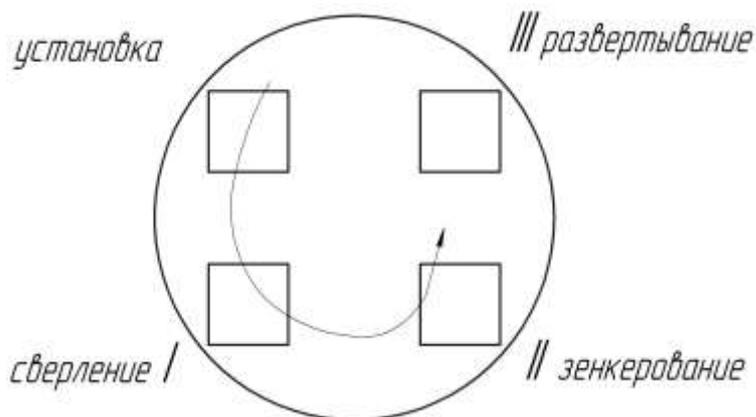


Рис. 3. Обработка заготовки на четырехпозиционном станке

## 1.2. Типы и организационные формы производства

*Тип производства* – классификационная категория производства, выделяемая по признакам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска продукции.

Тип производства определяется коэффициентом закрепления операций:

$$K_{30} = \frac{N_o}{C_p},$$

где  $N_o$  – количество различных операций, выполняемых на участке или в цехе в течение месяца;

$C_p$  – количество рабочих мест на участке или в цехе.

Коэффициент закрепления операций:

1. Определяется для участка или цеха, следовательно, в пределах предприятия могут существовать участки и цеха с различными типами производства;

2. Отчетным периодом при определении типа производства является *месяц* (не квартал, не неделя и не год);

3. Физический смысл этого коэффициента представляет собой количество переналадок оборудования на участке или в цехе за месяц, т. е. среднее количество различных операций, закрепленных за рабочим местом на участке или в цехе.

В соответствии с величиной этого коэффициента различают три типа производства:

1. Массовое производство  $K_{30} = 1$

При этом под массовым понимается производство, характеризуемое большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна и та же технологическая операция.

2. Серийное производство

Серийное производство характеризуется изготовлением или ремонтом

изделий периодически повторяющимися партиями.  $1 < K_{30} \leq 40$

В зависимости от количества изделий в партии и значения коэффициента закрепления операций различают мелкосерийное, среднесерийное, крупносерийное производство.

Для мелкосерийного производства:  $20 < K_{30} \leq 40$

Для среднесерийного производства:  $10 < K_{30} \leq 20$

Для крупносерийного производства:  $1 < K_{30} \leq 10$

3. Единичное производство.

Единичное – производство, характеризуемое малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых не предусматривается.

Коэффициент закрепления операций не нормируется.

В настоящее время установлены две формы организации технологических процессов:

- непоточная;
- поточная.

*Поточная форма* производства характеризуется:

- специализацией каждого рабочего места на одной операции;
- постоянством такта выпуска;
- размещением рабочих мест в последовательности, строго соответствующей технологическому процессу;
- наличием специализированного транспорта.

*Непоточная форма* производства характеризуется:

- специализацией рабочих мест на группе операций;
- однородностью конструктивно-технологических признаков изделий;
- единством средств технологического оснащения одной или нескольких операций;
- отсутствием такта выпуска;
- отсутствием специализированного транспорта.

Поточная форма применяется для массового и серийного производства, и реализуется в виде поточных линий (рис. 4).



Рис. 4. Виды поточных линий

## 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

В процессе изготовления и эксплуатации детали на ее поверхности возникают неровности, в поверхностном слое изменяется структура металла, фазовый и химический состав, а в детали возникают внутренние напряжения.

**Поверхностный слой детали** – наружный слой детали с измененной структурой, фазовым и химическим составом по сравнению с основным металлом, из которого изготовлена деталь. Внешняя поверхность этого слоя граничит с окружающей средой или с сопряженной деталью. Существуют различные схематические представления зон поверхностного слоя.

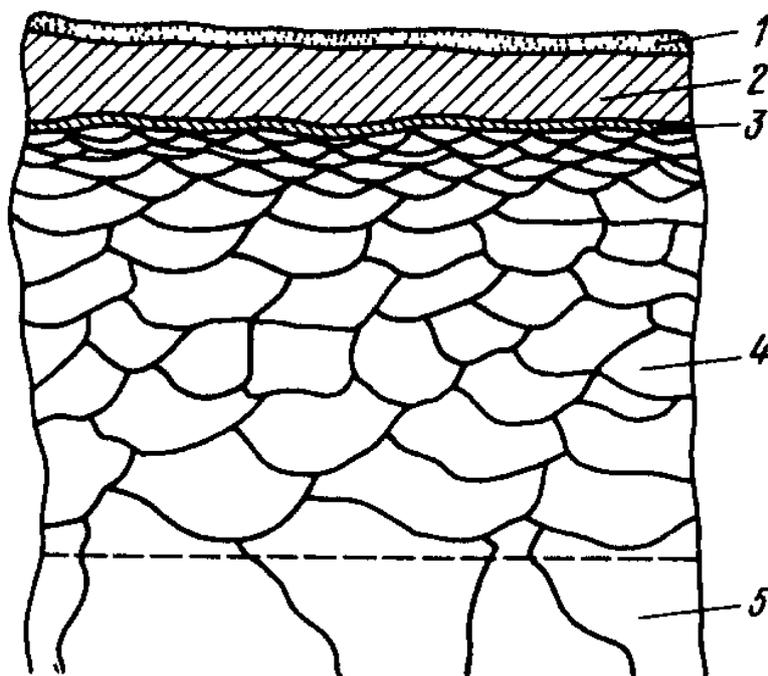


Рис. 5. Схема поверхностного слоя детали

Одна из этих схем показана на рис. 5 и состоит из 5-и зон:

- \* зону 1 адсорбированных из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ (воды, промывочной или смазывающе-охлаждающей жидкости – (СОЖ), и др. толщиной от 1 до 100 нм;

- \* зону 2 продуктов химического взаимодействия металла с окружающей средой (обычно оксидов), толщиной 10 – 1 мкм;

- \* граничную зону 3 толщиной в несколько межатомных расстояний; металл в этой зоне имеет иную, чем в объеме, кристаллическую и электронную структуру;

- \* зону 4 с измененной структурой, фазовым и химическим составом толщиной около 10... 150 мкм и более, возникающую при изготовлении детали и изменяющуюся в процессе эксплуатации;

- \* зону 5 основного металла.

Толщина и состояние этих слоев может изменяться в зависимости от со-

става материала, метода обработки условий эксплуатации. Оценка этого состояния осуществляется методами химического, физического или механического анализа. Многообразие состояния поверхностного слоя и методов его оценки не позволяет выделить единственный показатель, определяющий качество поверхностного слоя. Поэтому в научной и инженерной практике качество ПС оценивается набором единичных или комплексных параметров, выбор которых зависит от метода оценки.

Для характеристики и оценки ПС деталей после различных методов и режимов обработки разработана классификация параметров ПС:

- 1) геометрические параметры неровности поверхности;
- 2) физическое состояние;
- 3) химический состав;
- 4) механическое состояние.

**1. Геометрические параметры неровности поверхности** оцениваются параметрами шероховатости, волнистости и регулярных микрорельефов.

**Геометрические отклонения реальной поверхности** условно делят на макрогеометрические (отклонения геометрической формы и волнистость) и микрогеометрические (шероховатость).

**Макрогеометрические отклонения от правильной геометрической формы** (собственно погрешности формы), это – единичные, на протяжении всей рассматриваемой поверхности, отклонения от идеальной геометрической формы поверхности: овальность, конусность, бочкообразность (рис. 6). Они характеризуются значительным отношением протяженности ( $L_1$ ) поверхности к отклонению от ее правильной формы ( $h_1$ ):  $L_1/h_1 > 1000$ . Высота отклонения может составлять  $10^2$ – $10^3$  мкм на всей его длине.

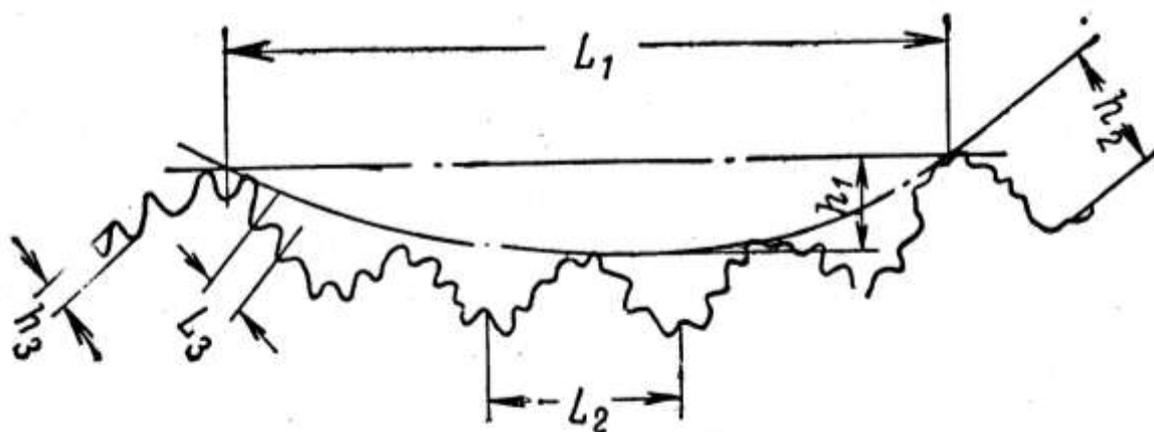


Рис. 6. Макро- и микрогеометрические отклонения

**Волнистость поверхности**, т. е. наличие многих, многократно и закономерно повторяющихся, более или менее одинаковых по размерам отклонений, носящих характер волн, при отношении их шага ( $L_2$ ) к высоте ( $h_2$ ) наиболее часто в пределах  $50 \leq L_2/h_2 \leq 1000$ . Высота неровностей может составлять  $10^2$ – $10^3$  мкм.

Причиной появления волнистости поверхности являются вибрации обрабатываемой детали, станка и инструмента, неравномерность протекания процесса резания вследствие различных причин (неравномерности подачи и пр.), а также другие факторы.

Наиболее отчетливо волнистость проявляется при точении, фрезеровании, строгании, протягивании и шлифовании.

**Волнистость поверхности** в России не стандартизована, и для ее оценки используют параметры, аналогичные параметрам шероховатости, или параметры, установленные отраслевыми нормами или зарубежными стандартами.

Волнистость поверхности оценивается:

- высотой волнистости  $W_z$ , мкм;
- максимальной высотой волнистости  $W_{max}$ , мкм;
- средним шагом волнистости  $S_{m_w}$  и др.

**Микрогеометрические отклонения или микронеровности**, обуславливающие шероховатость, негладкость поверхности и характеризующиеся малым отношением их шага ( $L_3$ ) к высоте ( $h_3$ ) в пределах  $L_3/h_3 < 50$ .

Различают поперечную и продольную шероховатости (рис. 7). Первая характеризуется микронеровностями в направлении движения подачи АС, вторая – в направлении главного движения АВ. На рис. 7 шаг волн обозначен  $L_2$ , шаг поперечных микронеровностей –  $L_3$  и шаг продольных микронеровностей –  $L'_3$ .

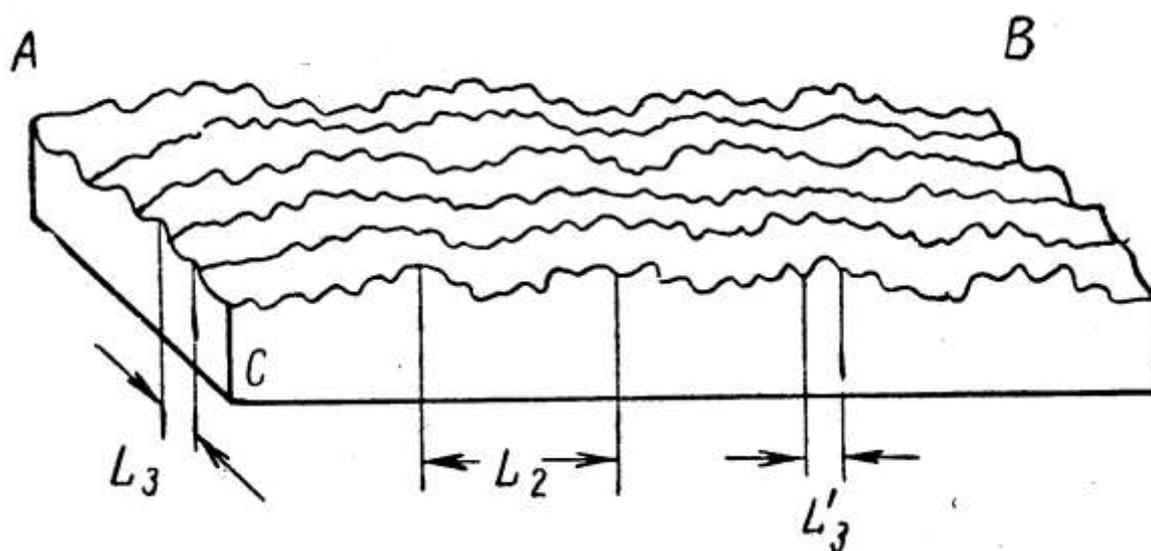


Рис. 7. Поперечная и продольная шероховатости

Характер и расположение микронеровностей по отношению к направлению подачи зависят, главным образом, от способа обработки. Так, при грубом точении и строгании наибольшая шероховатость наблюдается в направлении движения подачи, т. е. для этих способов обработки, как и для большинства других, характерна поперечная шероховатость. Оценку чистоты обработки поверхности детали производят в том направлении, в котором получают

наибольшие значения высот микронеровностей, т. е. в направлении наибольшей шероховатости поверхности.

**Шероховатость поверхности** характеризуется рядом стандартизованных по ГОСТ 2789-73:

- средним арифметическим отклонением профиля –  $Ra$ , мкм;
- высотой неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$ , мкм;
- наибольшей высотой неровностей профиля  $Rmax$ , мкм;
- средним шагом неровностей профиля –  $Sm$ , мм;
- средним шагом неровностей профиля по вершинам  $S$ , мм;
- относительной опорной длиной профиля  $tp$ , %.

При необходимости используют также и не стандартизованные параметры по ГОСТ 25142-82 и результатам работ, выполненных Э.В. Рыжовым, Н.Б. Демкиным, А.Г. Суловым, Ю.Г. Шнейдером и рядом других исследователей

**Регулярные микрорельефы (РМР)** – это неровности, которые в отличие от шероховатости одинаковы по форме, размерам и взаиморасположению. В соответствии с ГОСТ 24773-81 поверхности бывают с полностью или частичным регулярным микрорельефом.

**2. Физическое состояние** поверхностного слоя деталей в технологии механической обработки наиболее часто характеризуются параметрами структуры и фазового состава.

**Структура** – это характеристика металла, зависящая от методов изучения его строения. В связи с этим выделяют следующие типы структур: кристаллическая структура; субструктура; микроструктура; макроструктура.

**Кристаллическая структура и субструктура** могут быть определены методами прямого или косвенного анализа.

**Микроструктура** – это структура, определяемая с помощью металлографических микроскопов. С помощью этого анализа можно определить наличие, количество и форму структурных составляющих сплава.

**Макроструктура** – это структура, которая определяется не вооруженным глазом или при небольших увеличениях. С помощью макроанализа можно определить трещины, неметаллические включения, примеси и др.

Основные параметры структуры:

- размер зерен –  $l_z$ , мкм;
- форма и распределение зерен;
- ориентация решетки монокристаллического материала;
- текстура поликристаллического материала;
- плотность дислокаций –  $\rho_d$ , см<sup>3</sup>;
- концентрация вакансий –  $C_v$ ;
- размер (форма) блоков –  $l_b$ , нм,
- угол разориентировки блоков –  $\alpha_b$ , (град),
- размер областей когерентного рассеяния –  $\langle D \rangle$ , нм;
- среднее квадратическое смещение атомов, вызванное статическими ис-

кажениями решетки –  $\langle u^2_{\tau} \rangle$ , нм<sup>2</sup>;

- среднее квадратическое смещение атомов, вызванное их тепловыми колебаниями  $\langle u^2 \rangle$ , нм<sup>2</sup>;

**Фазовый состав** характеризуют числом и концентрацией фаз, распределением фаз по поверхностному слою, типом кристаллической структуры фаз, объемом сплава и др.

Основные параметры фазового состава:

- число, концентрация и распределение фаз;
- тип кристаллической структуры фаз –  $MS$  ;
- параметры решетки фаз –  $a, b, c$  , нм;  $\alpha, \beta, \gamma$  , град.

**3. Химический состав** характеризуется элементным составом сплава и фаз, концентрацией элементов в объеме фаз, объеме сплава и др.

Параметры химического состава:

- концентрация (распределение) элементов в поверхностном слое –  $C_x$ , %;
- концентрация элементов в фазах  $C_{\phi}$ , %.

Исследования химического состава поверхностного слоя позволяют оценить адсорбцию из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ, диффузионные процессы, процессы окисления и другие, происходящие при обработке металлов.

Методы исследования физического и химического состояния поверхностного слоя позволяют дать объяснения явлениям, происходящим в поверхностном слое при обработке и установить их связь со свойствами металла.

Однако параметры физико-химического анализа довольно сложно определяются, связать их с технологией можно только на эмпирическом уровне.

Для решения технологических задач в большинстве случаев достаточно знания о средних показателях состояния довольно большой группы атомов материала. Это позволяет перейти от микроскопического уровня анализа материала к макроуровню. В этом случае металл рассматривается не как дискретная, а как сплошная среда. Ее поведение описывается уравнениями механики сплошных сред, которые устанавливают связь кинематических характеристик (деформированного состояния) с силовыми (напряженное состояние). Эта связь устанавливается на основе принятия специальных гипотез и постановки соответствующих экспериментов.

**4. Механическое состояние** включает параметры:

- сопротивления металла деформированию: предел упругости, предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности, твердость и др.;
- пластичности: относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость и др., устанавливаемые специальными испытаниями образцов.

В процессе пластической деформации, которая всегда сопровождается механической обработкой, все характеристики механического состояния поверхностного слоя изменяются: показатели сопротивления деформированию увеличиваются, а показатели пластичности уменьшаются. Это явление называется

**деформационным упрочнением** (наклепом). С механической точки зрения процесс упрочнения можно представить следующим образом, используя для простоты билинейную аппроксимацию реальной кривой течения металла (рис. 2.4).

Нагружение неупрочненного металла в упругой области происходит вдоль участка 1 до предела текучести неупрочненного металла  $\sigma_{T0}$ . Угол наклона упругого участка  $\alpha$  определяется модулем Юнга  $E$ . Предположим, что дальнейшее нагружение в области пластического течения происходит до некоторых значений деформаций и напряжений вдоль участка 2, имеющего угол наклона  $\beta$ . Упругое разгружение металла при снятии нагрузки происходит до нулевых значений напряжений вдоль участка 3, имеющего равный участку 1 угол наклона. При этом металл детали получает пластическую деформацию  $\varepsilon_{пл}$ , упрочняется и по сечению детали формируются остаточные напряжения.

Повторное нагружение упрочненной детали происходит уже вдоль участка 3 в направлении, обратном указанному стрелкой на рис. 8. При этом, напряжения предела текучести металла возрастают до уровня  $\sigma_{Ty}$ .

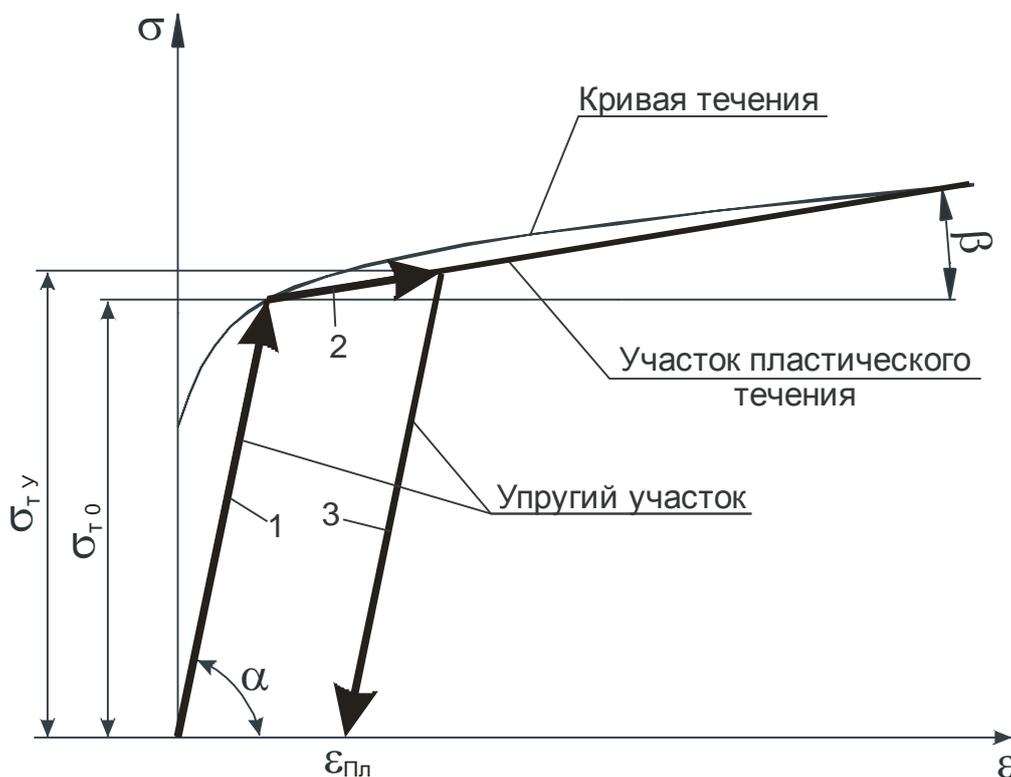


Рис. 8. Кривая течения металла (билинейная аппроксимация)

Параметры упрочнения (наклепа):

- глубина наклепа –  $h$ , мкм;
- степень наклепа –  $\delta$ , %;
- градиент наклепа –  $u_\delta$ , МПа/мм.

Важной характеристикой механического состояния ПС являются остаточные напряжения.

**Остаточные напряжения** – это упругие напряжения, которые остались в

детали после обработки. В зависимости от объемов тела, в которых рассчитывают остаточные напряжения (ОН), они условно подразделяются на, МПа:

- первого рода, уравновешенные в макрообъемах тела –  $\sigma'_{ост}$  ;
- второго рода, уравновешенные в пределах размера зерен –  $\sigma''_{ост}$  ;
- третьего рода, уравновешенные в пределах нескольких межатомных расстояний (статические искажения решетки) –  $\sigma'''_{ост}$  .

Состояние поверхностного слоя после обработки дополнительно может быть охарактеризовано интенсивностью катодной электронной эмиссии, работой выхода электронов, глубиной выхода электронов, магнитными шумами (эффектом Баркгаузена), электрохимическим потенциалом и другими эффектами.

### 3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАЗРУШЕНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

По характеру воздействия на деталь нагрузки могут быть *статические и динамические*, что определяется скоростью приложения нагрузки. Они могут действовать на всю деталь или на отдельные ее участки.

Приложенные нагрузки могут вызвать в детали деформации *растяжения, сжатия, изгиба и кручения*. При этом могут происходить относительные макро- и микроперемещения сопрягаемых поверхностей и их изнашивание. По направлению и величине внешние нагрузки могут быть *постоянными и переменными* (в том числе знакопеременными). В конкретных условиях эксплуатации детали машин подвергаются, как правило, одновременно нескольким видам нагрузок. Чаще всего это *знакопеременный изгиб с кручением, изгиб с растяжением, изгиб с местным контактным сжатием* и др. В связи с условиями нагрузок различают 4 типа конструкционной прочности: *статическую, длительную статическую, малоцикловую и усталостную (многоцикловую)*.

К основным видам разрушений деталей машин при эксплуатации относятся: *деформации и изломы, изнашивание, коррозионные повреждения, коррозионно-механические повреждения, эрозионно-кавитационные повреждения.*

*Статическая прочность* характеризуется сопротивлением элемента конструкции действию постоянной однократно приложенной нагрузки. Прочность материала при высокой температуре характеризуется длительной прочностью, под которой понимаются напряжения, вызывающие разрушение при заданной температуре и определенной длительности нагрузки. При высокой температуре наблюдается явление *ползучести*, когда металл медленно и непрерывно пластически деформируется под действием постоянных нагрузок.

Разрушение металла под действием переменных напряжений в течение некоторого времени (или количества циклов) носит *усталостный характер*. Под *усталостью* материалов понимается изменение механических и физических свойств материалов при длительном действии циклически изменяющихся по времени напряжений.

Способность материалов или деталей машин сопротивляться усталостному разрушению в течение определенного времени называют *сопротивлением усталости, которое характеризуется пределом выносливости* (ГОСТ 23201-78). *Предел выносливости* – это наибольшее по абсолютной величине напряжение цикла, при котором материал не разрушается при заданном количестве циклов. По числу  $N$  нагрузочных циклов усталость подразделяется на: малоцикловую при  $N < 5 \cdot 10^4$  и многоцикловую при  $N > 5 \cdot 10^4$ .

Зависимость между числом циклов до разрушения и амплитудой максимальных разрушающих напряжений цикла выражается кривой усталости материала. Кривые усталости строятся в логарифмических ( $\lg \sigma - \lg N$ ) или полуполулогарифмических ( $\sigma - \lg N$ ) координатах (рис. 9).

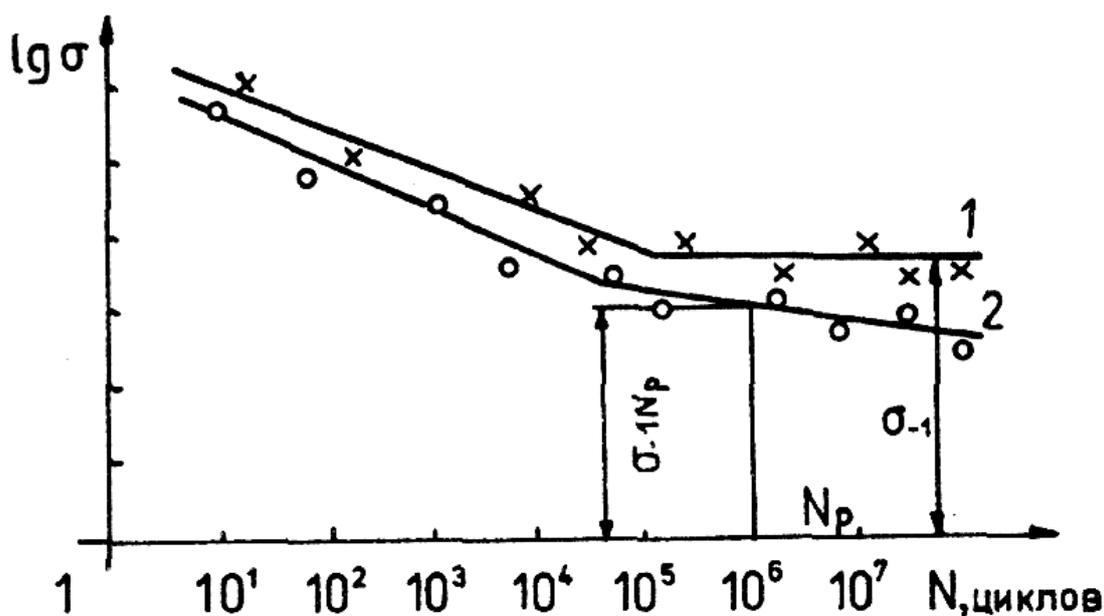


Рис. 9. Кривые усталости: 1 – с пределом выносливости;  
2 – с ограниченным пределом выносливости;

В зависимости от особенностей материала, температуры испытаний и физико-химической активности среды кривые усталости могут иметь либо асимптотический характер (рис. 9, кривая 1) либо непрерывно снижающийся (кривая 2). Величина амплитуд напряжений  $\sigma$ , являющихся асимптотами кривых усталости 1-го типа – это предел выносливости материала, а величину амплитуд напряжений ( $\sigma$ ,  $N_p$ ), для которых разрушение наступает при числе циклов  $N_p$  (по кривой 2-го типа) называют ограниченным (по числу циклов) пределом выносливости.

Материалам более стабильных структур и для более низких температур свойственны кривые усталости 1-го типа; материалам менее стабильных структур, для более высоких температур и активных сред – кривые 2-го типа. Малоцикловые усталостные разрушения происходят в результате воздействия малого числа циклов при повышенных напряжениях (упругопластическом деформировании). При многоциклового усталости разрушение материала протекает в основном при напряжениях, соответствующих зоне упругого деформирования.

**Контактная жесткость** определяет способность ПС деталей, находящихся в контакте, сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать.

**Контактная усталость** наблюдается в виде контактного выкрашивания, которое наиболее характерно проявляется при скольжении или многократном соударении двух тел.

Причиной зарождения усталостных трещин в ПС являются касательные напряжения, поэтому развитие усталостных трещин совпадает с направлением их действия. Силы трения на контактирующих поверхностях увеличивают касательные напряжения. Нормальные напряжения на контактных площадках имеют максимальное значение на поверхности контактирующих тел, касатель-

ные же напряжения достигают максимальной величины на некоторой глубине от поверхности. Очагами микротрещин контактной усталости чаще всего бывают неметаллические включения и другие дефекты ПС.

**Контактная выносливость** характеризуется пределом усталостного выкрашивания, представляющим собой величину контактного давления при заданном числе циклов, не приводящего к питтингу. На процесс контактной усталости влияют физико-химические свойства и способ смазки. С повышением вязкости масла повышается предел контактной усталости.

При использовании поверхностного упрочнения толщина упрочненного слоя должна быть больше глубины расположения максимальных касательных напряжений, а материал основы должен обладать достаточной твердостью, предотвращающей продавливание упрочненного слоя под действием контактных давлений.

**Изнашивание** – это процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении материала от поверхности трения и (или) его остаточной деформации. Изнашивание является сложным физико-химическим процессом. В результате шероховатости, волнистости и отклонений от заданной геометрической формы реальных поверхностей касание сопрягаемых деталей и фрикционные связи носят дискретный характер. В процессе изнашивания исходный (технологический) микрорельеф преобразуется в эксплуатационный, т. е. на трущихся деталях формируется равновесная шероховатость.

Согласно ГОСТ 16429-70 все виды изнашивания разделены на основные группы.

**Механическое изнашивание** происходит в результате только механического взаимодействия материалов трущихся деталей. **Молекулярно-механическое изнашивание** происходит при трении материалов с воздействием молекулярных или атомарных сил. **Коррозионно-механическое изнашивание** происходит при трении материалов, вступивших в химическое взаимодействие со средой.

**Абразивное изнашивание** характеризуется тем, что на трущихся поверхностях присутствуют абразивные частицы, которые разрушают поверхность за счет резания и царапания с отделением стружки. Абразивные частицы на поверхности трения могут появиться в результате недостаточной очистки смазки, шаржирования (внедрения) абразива при обработке деталей, как продукт износа (твердые частицы структурных составляющих разрушенных микрообъемов материала). Многие детали машин работают в абразивной среде (например, зубья ковша экскаватора и др.). Разновидностью абразивного изнашивания является гидроабразивное и газоабразивное изнашивание, т. е. изнашивание твердыми частицами в потоке жидкости или газа.

**Адгезионное изнашивание** связано с возникновением в локальных зонах контакта поверхностей интенсивного молекулярного (адгезионного) взаимодействия, силы которого превосходят прочность связей материала ПС с основным материалом (рис. 10).

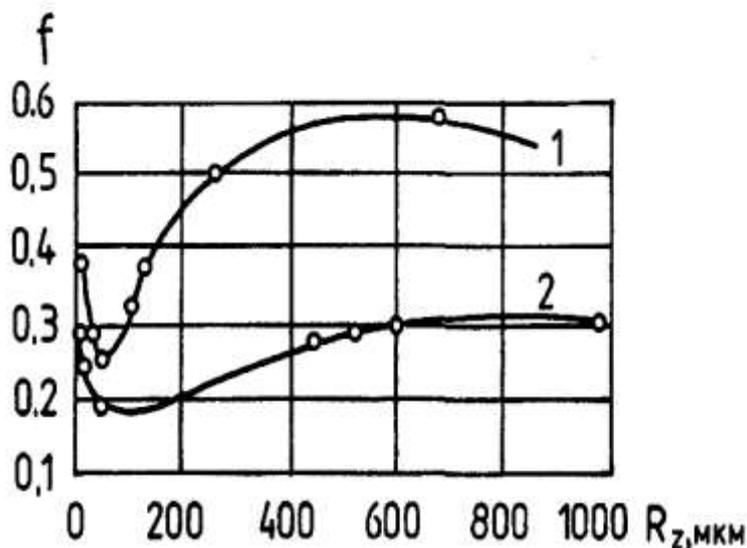


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения  $f$  от суммарной шероховатости  $R_z$  трущихся тел: 1 – чугун по стали; 2 – бронза по стали

**Изнашивание в условиях избирательного переноса** характеризуется такими атомарными явлениями в зоне контакта, которые формируют практически беззносные пары трения. В результате своеобразных механохимических процессов на поверхности трения образуется обогащенный медью тонкий мягкий слой, который обеспечивает минимальный коэффициент трения и равномерное распределение давления по поверхности трения.

**Окислительное изнашивание** происходит при наличии на поверхности трения защитных пленок, образовавшихся в результате взаимодействия материала с кислородом.

**Изнашивание под влиянием коррозии** происходит вследствие химического или электрохимического воздействия внешней среды. Металл поверхностного слоя обычно превращается в окислы, гидриды и разрушается.

По характеру внешней среды коррозию разделяют на 3 вида:

**Атмосферная коррозия** происходит при нормальном давлении и температуре ниже  $80^\circ\text{C}$ . Частицы воды, присутствующие в воздухе, являются электролитом, так как в них имеются соли, щелочи, кислоты. Они оседают на поверхность металла, образуя микрогальванический элемент, в котором растворяется анод. В начальной стадии коррозия имеет точечный характер, затем распространяется на всю поверхность.

**Газовая коррозия** частный случай химической коррозии, происходит в результате взаимодействия кислорода воздуха с металлом (особенно активно при температуре выше  $300^\circ\text{C}$ ).

**Коррозия под действием микрогальванических элементов.** Анодом и катодом этих пар могут служить различные структурные составляющие сплава, граница и сердцевина зерна, чистый металл и его окислы, напряженные и ненапряженные участки металла. Они имеют разные электродные потенциалы. Более высокий потенциал имеют анодные участки, поэтому они растворяются.

**Изнашивание в условиях фреттинг-коррозии** происходит при относительных колебательных перемещениях контактирующих металлических по-

верхностей с малой амплитудой в результате вибрации или относительных деформаций элементов конструкций. Механизм фреттинг-коррозии представляется как процесс периодического разрушения и последующего восстановления окисной пленки в точках контакта поверхности. На интенсивность фреттинг-коррозии влияют частота циклов, амплитуда колебаний, напряжения в контакте, смазка. Для протекания фреттинг-коррозии достаточны тангенциальные циклические перемещения контактирующих поверхностей с амплитудой ~25мкм. Коррозионно-механические повреждения возникают в результате действия коррозии и механических факторов (напряжений, деформаций, трения).

**Коррозионная усталость** – это процесс разрушения металлов и сплавов при одновременном действии коррозионной среды и циклических напряжений. Процесс развития трещин коррозионной усталости протекает более интенсивно, чем в обычных условиях, т.к. среда действует на дно и стенки трещины, а продукты коррозии вызывают расклинивающий эффект. При этом если преобладает влияние циклических нагрузок, то процесс носит название фреттинг-усталости.

**Коррозионное растрескивание (КР)** происходит под действием статических напряжений и коррозионной среды. Причины КР:

**Фреттинг-коррозия (коррозия при трении)** возникает при относительном колебательном (несколько мкм) перемещении деталей в месте контакта.

**Эрозионное и кавитационное разрушение** происходит в потоке жидкости или газа в результате непрерывного разрушения и удаления окисных пленок с поверхности детали. **Эрозия** – это процесс постепенного послойного разрушения поверхности металлов под влиянием механических воздействий или электрических разрядов (электроэрозия). На интенсивность эрозии влияет скорость и температура потока, степень его запыленности (загрязненности), а также свойства материала детали.

**Кавитация** – это образование в капельной жидкости полостей, заполненных паром, газом или их смесью (так называемых кавитационных пузырьков или каверн). Они образуются в тех местах, где давление в жидкости становится ниже некоторого критического. У поверхности металла давление в потоке жидкости возрастает, размеры кавитационных пузырьков сокращаются с большей скоростью и захлопываются, создавая своего рода микрогидравлические удары. Многократно повторяющиеся удары приводят к разрушению поверхности детали (так называемая кавитационная эрозия), образованию каверн.

## 4. РЕМОНТ МАШИН

Первичное изготовление машин ведется из материалов и сырьевых полуфабрикатов. Однако отрасли машиностроения в дальнейшем не ремонтируют свои изделия. Сложившаяся практика использования техники показывает, что функции ее ремонта выполняют отрасли, потребляющие машины.

### 4.1. Определение понятий «ремонт» машин, «восстановление» и «упрочнение» деталей

Восстановить (согласно «Толковому словарю живого великорусского языка» В.И. Даля) – это приводить в первобытное состояние, обновлять, возобновлять.

**Ремонт** буквально означает «перемонтировать». В свою очередь, «монтаж» (фр. montage) – это подъем, сборка и установка машин и сооружений. Термин «ремонт» относится к машине или ее частям, к которым применимы воздействия, называемые разборочно-сборочными работами. Термин **«восстановление»** – приведение в прежнее состояние – относится к детали.

**Восстановление изношенных деталей** – это технологический процесс возобновления исправного состояния и ресурса этих деталей путем возвращения им утраченной части материала из-за изнашивания и (или) доведения до нормативных значений уровня свойств, изменившихся за время длительной эксплуатации машин.

Некоторые виды деталей отказывают в эксплуатации раньше других деталей в агрегате и определяют его послеремонтную наработку. Отказы этих деталей выявляются во время заводских испытаний и отремонтированных агрегатов путем длительного наблюдения, при этом изучаются и причины отказов.

**Упрочнение деталей**, лимитирующих наработку отремонтированных агрегатов, – это повышение сопротивляемости элементов этих деталей разрушению, остаточной деформации или изнашиванию. Упрочняющие мероприятия выполняются путем нанесения износостойких покрытий, термической или химико-термической обработки, поверхностного или объемного пластического деформирования материала заготовки.

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

**Ремонт машин** – экономически обоснованное устранение неисправностей и восстановлении их ресурса после длительной эксплуатации, т. е. вторичное производство техники из ее ремонтного фонда.

В любом случае по мере эксплуатации агрегатов и появления дефектов в его состоянии наступает предел, после которого дальнейшая эксплуатация оказывается технически невозможной или экономически неоправданной. Критерии предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией. В связи с этим различают:

**Допустимый износ** – износ, при котором данное соединение будет работоспособным в течение последующего межремонтного срока.

**Предельный износ** – износ, при котором дальнейшая нормальная работа данного соединения в течение очередного межремонтного периода невозможна. Предельный износ базовой и основных деталей агрегатов автомобиля определяет их предельное состояние.

В технике различают следующие состояния объекта: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное. Переход объекта из исправного состояния в неисправное, из работоспособного в неработоспособное состояние характеризуется повреждением и отказом.

**Повреждение** – это событие, заключающееся в нарушении исправности автомобиля (агрегата) вследствие влияния внешних воздействий, превышающих уровни, установленные в нормативно-технической документации. Повреждение может быть **несущественным**, при котором работоспособность автомобиля сохраняется, и **существенным**, которое может явиться причиной нарушения работоспособности и привести к отказу.

**Отказ** – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности автомобиля (агрегата), т. е. это событие, при котором происходит **полная** или **частичная** потеря им работоспособности. Появление отказа всегда связано с возникновением неисправности. Достижение предельного износа, например, деталей гильзо-поршневой группы будет считаться отказом, а двигатель при этом переходит в неисправное состояние. **Вместе с тем появление неисправности не всегда приводит к отказу.** Например, нарушение лакокрасочного покрытия квалифицируется как неисправность автомобиля, но это не отказ, так как при этом его работоспособность не нарушается.

## 4.2. Виды и методы ремонта

**Текущий ремонт** выполняется для обеспечения работоспособного состояния подвижного состава с восстановлением или заменой отдельных его агрегатов, узлов и деталей (кроме базовых), достигших предельного состояния. Текущий ремонт должен обеспечить безотказную работу отремонтированных агрегатов, узлов и деталей на пробеге не меньшем, чем до очередного технического обслуживания. Потребность в текущем ремонте выявляется в процессе эксплуатации конкретного автомобиля или при ТО и плановом диагностировании.

**Капитальный ремонт** предназначен для восстановления исправности и близкого к полному (не менее 80 %) ресурса подвижного состава, агрегатов и узлов. В большинстве случаев капитальный ремонт, как правило, выполняется обезличенным методом, предусматривающим полную разборку объекта ремонта, дефектацию, восстановление или замену составных частей, сборку, обкатку и испытание. Капитальный ремонт желательно выполнять на специализированных ремонтных предприятиях.

Техническое состояние и причины неисправности подвижного состава и его составных частей определяют при помощи средств и методов безразборного диагностирования. Агрегат направляется в капитальный ремонт, если:

– базовая и основные детали нуждаются в ремонте, требующем полной разборки агрегата. При этом к базовым деталям агрегатов обычно относят кор-

пусные детали. Например, в двигателе базовой деталью является блок цилиндров, в коробке передач – картер. А к основным деталям, например, в двигателе относят головку цилиндров, коленчатый вал, маховик, распределительный вал, картер сцепления; в коробке передач – крышку картера верхнюю, первичный, вторичный и промежуточный валы и т. п.;

– работоспособность агрегата не может быть восстановлена или ее восстановление экономически нецелесообразно путем проведения текущего ремонта.

**Обезличенный метод ремонта** характеризуется тем, что детали и сборочные единицы не сохраняют при ремонте принадлежность к определенному объекту. Этот метод ремонта широко применяется на специализированных авторемонтных предприятиях.

Многолетняя практика показывает, что существующая организация капитального ремонта обезличенным методом является весьма **несовершенной из-за высокой себестоимости (80 % и более стоимости нового) и низкого уровня качества** (ресурс капитально отремонтированных агрегатов составляет 20...50 % ресурса нового). Обезличивание деталей является одной из причин большого числа выполняемых капитальных ремонтов за срок службы агрегата, что в конечном счете приводит к значительному росту затрат на поддержание его работоспособности в процессе эксплуатации.

Обезличенный капитальный ремонт агрегатов влечет за собой еще и ряд негативных последствий:

- неоправданно возрастает доля разборочно-сборочных работ в общей трудоемкости ремонта (до 30 % и более);
- нарушается приработанность высокоресурсных сопряжений;
- повышается вероятность повреждений годных деталей в процессе разборки (повреждается до 15...20 % деталей).

Обезличивание деталей в ходе выполнения ремонтных работ является одной из причин полной неопределенности в ресурсах элементов вновь собранных агрегатов.

Принимая во внимание перечисленные негативные стороны обезличенного ремонта, следует признать, что гарантировать надежную и долговечную работу агрегатов, отремонтированных по этому методу, не представляется возможным. Поэтому этот метод ремонта должен уйти в прошлое.

**Необезличенный метод ремонта** характеризуется тем, что годные и восстановленные детали и сборочные единицы сохраняют свою принадлежность к определенному объекту ремонта. Этот метод ремонта практически исключает все недостатки обезличенного ремонта. Однако боязнь усложнения организации производства при этом методе на специализированных предприятиях с большим годовым объемом выпуска ограничивает сферу его использования. Применяется он главным образом в небольших сервисах и мастерских при индивидуальном ремонте отдельных экземпляров автомобильной техники.

Организация необезличенного ремонта или ремонта с меньшей долей обезличивания в условиях специализированных предприятий позволяет коренным образом улучшить показатели эффективности и качества продукции ре-

монтажного предприятия при сохранении индустриальных методов ремонта. Максимальный эффект от внедрения необезличенного ремонта может быть достигнут только при оптимальном сочетании индустриальных форм организации производства ремонта и индивидуальных методов контроля технического состояния ремонтируемых агрегатов.

К прогрессивной форме организации ремонтного обслуживания следует отнести также агрегатный метод ремонта.

*Агрегатный метод ремонта* характеризуется тем, что неисправные агрегаты заменяются новыми или отремонтированными. Возможность полного использования ресурса каждого агрегата является главным достоинством агрегатного метода по сравнению с ремонтом полнокомплектного изделия. Кроме полного использования ресурса агрегатов, к достоинствам агрегатного метода следует отнести снижение простоев в ремонте, повышение технической готовности парка автомобилей, увеличение объема выполненной работы тем же числом автомобилей, углубление специализации ремонтных предприятий; автомобили при этом не обезличиваются.

Применение агрегатного метода ремонта позволяет резко сократить число капитальных ремонтов автомобилей, а в перспективе и отказаться от него. Необходимое условие внедрения агрегатного метода ремонта – это создание оборотного и обменного фондов агрегатов. Практика показывает, что основной источник комплектования этих фондов – капитально отремонтированные или годные к эксплуатации без ремонта агрегаты списанных автомобилей. В настоящее время агрегатный ремонт для автомобилей иностранного производства базируется на так называемых авторазборах.

## 5. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОИЗВОДСТВА И СОДЕРЖАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

### 5.1. Состояния детали

Машины состоят из первичных неразделяемых элементов – деталей. Деталь (по ГОСТ 2.101-68) – это изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций. К деталям относят также изделия с покрытиями и изделия, полученные с помощью сварки, пайки, склеивания и подобных процессов.

Деталь может пребывать в исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном и предельном состояниях.

**В исправном состоянии** деталь соответствует всем требованиям нормативной, конструкторской или технологической документации, а если деталь не соответствует хотя бы одному из требований этой документации, то она признается неисправной.

**Работоспособное** состояние детали такое, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданную функцию, соответствуют требованиям нормативной документации. Если значение хотя бы одного из этих параметров не отвечает требованиям нормативной документации, то деталь признается неработоспособной.

**Предельное** состояние детали определяется тем, что ее дальнейшее применение по назначению технически невозможно или экономически нецелесообразно. При достижении предельного состояния у детали может быть, а может и не быть остаточная долговечность. В первом случае деталь может быть восстановлена, а во втором она отправляется в утиль.

По последствиям дефекты подразделяют:

**Критический** – это дефект, при котором использование детали практически невозможно.

**Значительный** – это дефект, который существенно влияет на использование детали по назначению и на ее долговечность, но не является критическим.

**Малозначительный** – это дефект, который не оказывает существенного влияния на использование детали по назначению и на ее долговечность.

По месту расположения:

**Наружные** дефекты, такие как деформация, поломки, изменение геометрической формы и размеров, легко выявляют визуально или в результате несложных измерений.

**Внутренние** дефекты, такие как усталостные трещины, трещины термической усталости и т. п., выявляют различными методами структуроскопии деталей.

По возможности исправления:

**Исправимые** дефекты – это дефекты, устранение которых технически возможно и экономически целесообразно. К ним относят такие дефекты, как деформации, вмятины, обломы, износ поверхностей, задиры и другие дефекты, не ведущие к полной утрате работоспособности детали.

**Неисправимые** дефекты – это дефекты, устранение которых технически невозможно или экономически нецелесообразно.

По причинам возникновения дефекты подразделяют на три класса:

**Конструктивные** дефекты – это дефекты, выражающиеся в несоответствии требованиям технологического задания или установленных правил разработки (модернизации) продукции. Причины таких дефектов могут быть весьма различны: ошибочный выбор материала изделия, неверное определение размеров деталей, режима термической обработки и т. д. Эти дефекты являются следствием несовершенства конструкции и ошибок конструирования.

**Эксплуатационные** дефекты – это дефекты, которые возникают в результате износа, усталости, коррозии и неправильной эксплуатации. В процессе эксплуатации наибольший процент отказов возникает в результате изнашивания деталей.

**Производственные** дефекты – это дефекты, выражающиеся в несоответствии требованиям нормативной документации на изготовление (ремонт) или поставку продукции. Такого рода дефекты возникают, в результате нарушения технологического процесса при изготовлении или восстановлении деталей.

Производственные дефекты подразделяют на 6 групп:

1. Дефекты плавления и литья. К ним относятся: отклонения химического состава от заданного, ликвация, газовые поры, земляные и шлаковые включения, усадочные раковины, спаи, горячие и холодные трещины и др.

2. Дефекты, возникающие при обработке давлением. К ним относятся: поверхностные и внутренние трещины, разрывы, риски, волосовины, закаты, плены, расслоения, флокены, зажимы и т. д.

3. Дефекты термической, химико-термической и электрохимической обработки. В эту группу входят: термические трещины, обезуглероживание, науглероживание, водородные трещины, перегрев, пережог, трещины отслаивания и др.

4. Дефекты механической обработки. К этой группе относятся: отделочные трещины, прижоги, шлифовочные трещины, нарушение герметических размеров.

5. Дефекты, возникающие при правке, монтаже и демонтаже. К ним относятся: рихтовочные и монтажные трещины, погнутость, обломы резьбы, нарушение посадок.

6. Дефекты соединения металлов сваркой и наплавкой. В эту группу входят: раковины, поры, шлаковые включения, перегрев, изменение размеров зерна, горячие и холодные трещины, непровар, неполное заполнение шва, нахлест, смещение кромок шва, непропаивание, непрочлеивание, отслоение и др.

Трудоемкость восстановления деталей составляет 30...50 % общей трудоемкости процесса ремонта машин и является частью процесса ремонта машин (рис. 12).

Наибольшая доля трудоемкости процесса ремонта машин приходится на восстановление их изношенных деталей, однако и наибольшая доля экономической эффективности всего процесса ремонта обеспечивается восстановлением этих деталей.

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

Задача технолога состоит в разработке технологического процесса, который обеспечит указанные ограничения при наименьшем расходе материальных, трудовых и энергетических ресурсов.

## 5.2. Структура процесса восстановления деталей

Изношенная деталь ремонтного фонда на пути своего превращения в годную деталь в результате технологических воздействий на нее исполнителей и средств ремонта проходит такие стадии (рис. 11): **исходная заготовка, ремонтная заготовка, восстановленная деталь.**

В результате очистки от эксплуатационных загрязнений и работ по определению технического состояния ремонтного фонда выявляют детали, которые имеют устранимые повреждения и подлежат восстановлению. Такие детали являются исходными заготовками, которые собирают в группы с одинаковыми сочетаниями устранимых повреждений и в виде партий направляют на соответствующие участки восстановления. Таким образом, исходная заготовка – это очищенная деталь ремонтного фонда с устранимыми повреждениями.

**Исходная заготовка** в общем случае превращается в **ремонтную заготовку** путем создания припусков на восстанавливаемых поверхностях и нанесения швов на трещины, а **ремонтная заготовка в деталь** – в результате химико-термической и механической обработки.

Технологические воздействия на восстанавливаемую деталь состоят из блоков операций: предварительная механическая обработка для придания правильной геометрической формы изношенных элементов под нанесение покрытий или установку дополнительной ремонтной детали (ДРД); установку и закрепление ДРД, сварку трещин; нанесение покрытий или перераспределение материала путем его объемного пластического деформирования; размерную и структурную стабилизацию элементов; термическую обработку; механическую обработку черновую и чистовую; поверхностное пластическое деформирование; отделку, уравнивание; очистку от технологических загрязнений; контроль и консервацию.



Рис. 11. Схема технологического процесса восстановления детали

### 5.3. Определение восстановительного производства, его цель и задачи

**Ремонтное производство** представляет собой совокупность специализированных предприятий и самостоятельных производственных подразделений, которые ведут ремонт техники. Часть этого производства занята восстановлением изношенных деталей (рис. 12).

**Восстановительное производство** – это система сооружений, средств технологического оснащения и работников, обеспеченная нормативной, технологической и организационной документацией, потребляющая производственные ресурсы с целью превращения ремонтного фонда в исправные детали.

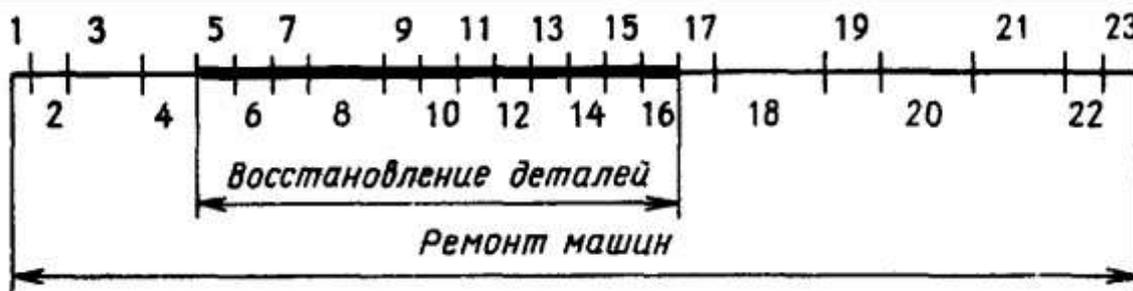


Рис. 12. Операции восстановления деталей в процессе ремонта машин:

1 – приемка машин в ремонт; 2 – диагностирование агрегатов; 3 – разборка машин, агрегатов и узлов; 4 – очистка машин, агрегатов, узлов; 5 – очистка деталей; 6 – определение технического состояния деталей; 7 – предварительная механическая обработка; 8 – нанесение покрытий, закрепление ДРД, пластическое деформирование; 9 – термическая обработка; 10 – черновая механическая обработка; 11 – термическая (химико-термическая) обработка; 12 – чистовая механическая обработка; 13 – поверхностное пластическое деформирование; 14 – отделка поверхностей; 15 – очистка от технологических загрязнений; 16 – контроль; 17 – комплектование деталей; 18 – сборка агрегатов (машин); 19 – окрашивание; 20 – обкатка; 21 – испытания; 22 – контроль; 23 – сдача заказчику

### 5.4. Отличительные признаки и особенности восстановительного производства

Ремонтно-восстановительное производство отличается от машиностроения рядом признаков (рис. 13). Оно имеет в своем составе ряд специализированных производств, которым нет аналогов в машиностроении. Это разборка машин и агрегатов, их очистка, определение технического состояния деталей, создание ремонтных заготовок, комплектование деталей различных категорий перед сборкой агрегатов. При ремонте необходимо диагностировать ремонтный фонд, ремонтируемые изделия и отремонтированные машины с целью неразрушающего и безразборного определения неисправностей, качества ремонта и остаточного ресурса деталей и сопряжений.

Ряд технологических процессов существует только в ремонтном производстве. К таким процессам относятся отделение эксплуатационных загрязнений от поверхностей деталей ремонтного фонда, разборка агрегатов после их длительной эксплуатации, нанесение восстановительных покрытий, восстановление жесткости, усталостной прочности и герметичности деталей и др. При

восстановлении деталей имеет место большое количество состояний исходных и ремонтных заготовок.

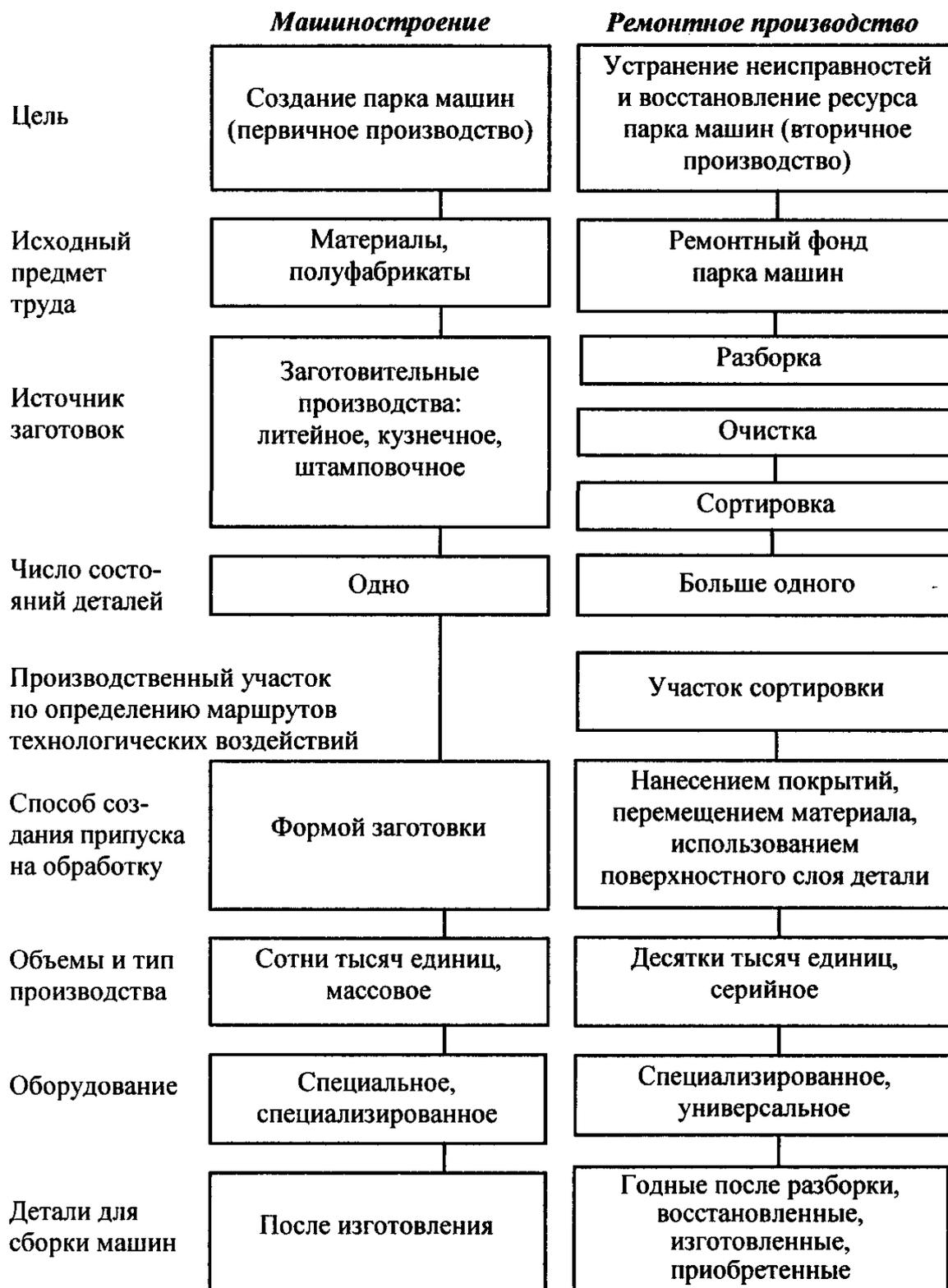


Рис. 13. Сопоставление признаков машиностроения и ремонтного производства

Здесь отсутствует этап отработки деталей на технологичность, потому что в качестве чертежей изделий применяют разработки машиностроительного производства с небольшими изменениями. Восстановление деталей должно

обеспечить значения параметров, примерно равные значениям параметров новых деталей при различных производственных возможностях.

Восстановительное производство требует создания переналаживаемых средств технологического оснащения и изготовления большого количества оснастки на универсальное оборудование.

### **5.5. Структура восстановительного производства**

Для выполнения своих функций ремонтно-восстановительное предприятие, как и впрочем и предприятие, выпускающее новые изделия, имеет в своем составе основное, вспомогательное и обслуживающее производства и заводоуправление.

**Основное производство** – это множество производственных участков с исполнителями и средствами технологического оснащения, которые непосредственно воздействуют на восстанавливаемые изделия во время их превращения из состояния ремонтного фонда в товарную продукцию. Основное производство занято выпуском продукции для продажи или обмена. Основным производством руководит директор завода.

Состав производственных участков предприятия определяется видом восстанавливаемых изделий, технологическими процессами, объемом и организацией производства.

**Вспомогательное производство** ремонтного завода служит для обеспечения жизнедеятельности основного производства. Оно изготавливает необходимые в основном производстве средства технологического оснащения, приобретение которых невозможно или нецелесообразно; поддерживает в исправном состоянии эти средства, здания и энергосистемы; обеспечивает основное производство ресурсами (теплом, холодом, водой, сжатым воздухом, чистым воздухом, газами, электроэнергией и др.). Службы вспомогательного производства включают инструментальный участок, отделы главного механика и энергетика и ремонтно-строительный участок. Вспомогательное производство подчинено главному инженеру.

**Обслуживающее производство** обеспечивает основное и вспомогательное производства материалами, полуфабрикатами и транспортными услугами. В его составе имеются: отдел снабжения, складское хозяйство, транспортный цех и отдел сбыта. Обслуживающим производством руководит заместитель директора.

**Заводоуправление** включает: администрацию, другие должностные лица, отделы и лаборатории. Состав и функции заводоуправления зависят от мощности и специализации предприятия. Заводские отделы: главного технолога и главного конструктора (может быть объединенный из них технический отдел), технического контроля, материально-технического снабжения, планово-экономический, финансово-сбытовой, производственно-диспетчерский, труда и заработной платы, кадров. Основные функции заводских лабораторий: химический и металлографический анализ материалов, ремонт и поверка средств измерений, сбор данных о надежности отремонтированной техники и др.

## **6. ЗАДАЧИ И ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОЦЕССАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ**

Механическая обработка ремонтных заготовок применяется для подготовки поверхностей под нанесение покрытий, является основным средством достижения точности геометрических параметров деталей (их номинальных и ремонтных размеров, формы, взаимного расположения, шероховатости и волнистости поверхностей).

Толщина восстановительных покрытий состоит из двух составляющих: 1-я соответствует расстоянию от окончательно обработанной поверхности до поверхности, на которую наносят покрытие, 2-я – это припуск на обработку.

Механическая обработка при восстановлении деталей отличается от изготовления деталей из отливок, проката или поковок. Это объясняется следующими причинами:

- преднамеренным разрушением некоторых технологических баз в конце процесса изготовления деталей;
- износом или повреждением группы баз во время работы машины;
- деформацией деталей в эксплуатации;
- небольшими значениями толщины припусков, материал которых, как правило, отличается от материала основы;
- различием в свойствах припусков при изготовлении и восстановлении деталей;
- требованием обеспечения необходимой точности взаимного расположения поверхностей, обрабатываемых при восстановлении, и поверхностей, обрабатываемых при изготовлении, а при восстановлении остающихся необработанными.

Таким образом, **копирование технологии механической обработки деталей при изготовлении машин для их восстановления не дает оптимальных результатов.**

## 7. КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И (СОЗДАНИЯ РЕМОНТНЫХ ЗАГОТОВОК)

**Ремонтная заготовка** – это состояние восстанавливаемой детали после создания припусков на ее поверхностях для последующей мех. обработки.

Припуск на последующую механическую обработку заготовки получают одним из 3 способов:

- выделение припуска из оставшегося материала на поверхности восстанавливаемого элемента самой детали для его обработки под один из ремонтных размеров.

- материал детали перемещают путем его пластического деформирования из неизнашиваемого объема в зону будущей обработки.

- на поверхность восстанавливаемого элемента наносят покрытия.



Рис. 14. Классификация способов восстановления деталей

**Покрытие** – это слой материала, нанесенный на восстанавливаемую поверхность детали и прочно соединенный с этой поверхностью. Химический, структурный и фазовый составы покрытия отличаются от соответствующих показателей основного материала (подложки).

При создании ремонтной заготовки формируют состав материала рабочих поверхностей детали путем выбора материала покрытия и условий его нанесения, что в значительной мере определяет послеремонтную надежность детали.

В дальнейшем необходимая совокупность структуры и свойств восстановленных поверхностей будет обеспечена термической, химико-термической и механической обработкой. Вид и свойства восстановительного покрытия должны быть совместимы со способом его обработки.

Численные значения свойств по толщине восстановительного покрытия и материала детали должны изменяться не скачкообразно, а плавно по установленному закону. Слой покрытия ближе к основе обеспечивает прочное соединение покрытия с материалом детали, следующий слой повышает механическую прочность детали, в том числе усталостную, а наружный слой, участвующий в трении, обеспечивает необходимую износостойкость восстановленного

элемента.

В основу **классификации** способов создания припусков на восстанавливаемых поверхностях положены признаки превращения основного материала в покрытие, а также виды потребляемой энергии. Процесс создания ремонтных заготовок будет определен, если указаны:

- время дробления исходного материала в процессе нанесения покрытия (перед нанесением, в процессе нанесения);
- вид и дисперсность материала наносимого покрытия (ионы, молекулы, макрочастицы, капли, вся масса покрытия);
- среда переноса материала (жидкий раствор, сжатый воздух, продукты горения газов, плазма, вакуум);
- состояние наносимого материала (твердое, жидкое, парообразное);
- состояние материала поверхности детали (твердое, жидкое);
- способ закрепления материала покрытия на восстанавливаемой поверхности (химический, механический, диффузионный и др.);
- способ защиты зоны нанесения покрытия от вредного влияния окружающей среды (без защиты, с местной защитой, в герметичной камере);
- виды энергии соответственно на диспергирование, активацию, перенос и закрепление материала (механическая, химическая, тепловая, электрическая, магнитная и др.).

## 8. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СЛЕСАРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

### 8.1. Восстановление деталей механической обработкой в ремонтный размер

При этом способе одну из изношенных деталей сопряжения (вал или отверстие цилиндра) подвергают механической обработке, придавая ей заданный ремонтный размер и устраняя при этом искажения геометрической формы и дефекты поверхности (риски, задиры), обеспечивают предписанную чертежом шероховатость.

Другую деталь сопряжения заменяют новой указанного ремонтного размера или восстановленной под этот ремонтный размер. Например, в сопряжении «гильза – поршень» обычно восстанавливают гильзу по рабочей поверхности цилиндра под ремонтный размер путем расточки с последующим хонингованием, а поршень ремонтного размера изготавливают новый; в сопряжении «коленчатый вал – вкладыши» коренные и шатунные шейки восстанавливают механической обработкой под ремонтный размер (шлифование, суперфиниширование), а вкладыши ремонтных размеров изготавливают новые на заводах автомобильной промышленности. Поршни и вкладыши приобретаются как запасные части.

Вопрос о том, какая деталь должна заменяться, а какая восстанавливаться, решается в основном соображениями экономического характера. Более дорогую деталь во всех случаях целесообразно восстанавливать под ремонтный размер, а менее дорогую – заменять новой.

Примером, когда обе детали сопряжения восстанавливают под ремонтный размер, может служить сопряжение «втулка клапана – клапан». Втулку разворачивают под ремонтный размер, а стержень клапана восстанавливают под увеличенный ремонтный размер гальваническим наращиванием.

*Ремонтный размер* детали зависит от ее износа и припуска на обработку. *Износ детали U* устанавливают обмером ее соответствующим инструментом. Чаще всего вал измеряют микрометром, а отверстие цилиндра индикаторным нутромером. *Припуск на обработку Z* назначается с учетом характера обработки, типа оборудования, размера и материала детали. Припуск должен учитывать искажения геометрической формы, вызываемые неравномерным износом, и способствовать получению правильной геометрической формы изношенной детали после механической обработки без наличия следов износа на ее рабочей поверхности. Обычно при токарной обработке или расточке  $Z = 0,05 \dots 0,10$  мм, при шлифовании (хонинговании)  $Z = 0,03 \dots 0,05$  мм.

Уменьшение диаметра шейки вала или увеличение диаметра отверстия за один ремонт с учетом износа и припуска на обработку называется ремонтным интервалом. Формирование ремонтного интервала и получение ремонтного размера показаны на рис. 15.

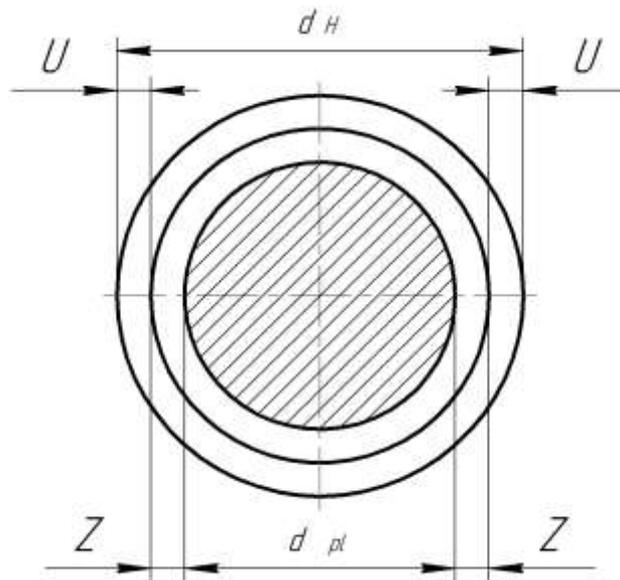


Рис. 15. Схема определения ремонтного размера вала при его равномерном износе

При равномерном износе вала ремонтный интервал

$$Y_B = 2 \cdot (U + Z), \quad (1)$$

а первый ремонтный размер

$$d_{pl} = d_n - Y_B,$$

где  $d_n$  – номинальный размер вала, мм.

Однако на практике детали изнашиваются, как правило, неравномерно и измерять их износ на сторону  $U$  без спецприспособления или специнструмента невозможно. Поэтому при контроле и сортировке определяют максимальный износ на диаметр  $U_{\max}$ . Для этого измеряют диаметр максимально изношенного вала или отверстия, а затем, зная их номинальные размеры, вычисляют износ  $U_{\max}$ :

для вала

$$U_{\max} = d_n - d_{\min},$$

где  $d_{\min}$  – минимально допустимый диаметр вала, мм;

для отверстия

$$U_{\max} = D_{\max} - D_n,$$

где  $D_{\max}$  – максимально допустимый диаметр отверстия, мм;  $D_n$  – номинальный размер отверстия, мм.

Соотношение износа на сторону  $U$  и максимального износа на диаметр  $U_{\max}$  можно выразить через коэффициент неравномерности износа

$$\beta = U / U_{\max}. \quad (2)$$

При равномерном износе  $U = 0,5 \cdot U_{\max}$  тогда  $\beta = 0,5$ ; при одностороннем износе  $U = U_{\max}$ , а  $\beta = 1$ . Таким образом,  $\beta = 0,5 \dots 1$ . Например, для шеек

коленчатого вала  $\beta = 0,6$ ; для гнезд под подшипники в картере коробки передач  $\beta = 0,8$ .

С учетом соотношения (2) формула (1) примет вид

$$Y_B = 2 \cdot (\beta \cdot U_{\max} + Z).$$

Количество ремонтных размеров:

для валов

$$n_B = (d_n - d_{\min}) / Y_B = \Delta d / Y_B,$$

где  $\Delta d$  – допустимое уменьшение диаметра вала, мм;

для отверстий

$$n_A = (D_{\max} - D_n) / Y_A = \Delta D / Y_A,$$

где  $Y_A$  – ремонтный интервал отверстия.

Минимально допустимый диаметр вала устанавливают исходя из глубины закаленного слоя и других лимитирующих факторов (прочности, толщины антифрикционного слоя вкладышей подшипников и др.). Максимальный допустимый диаметр отверстия устанавливают исходя из прочности и других факторов.

При обработке деталей под ремонтные размеры снимаются небольшие припуски, соответствующие чистовой обработке. Поэтому геометрия режущего инструмента и режимы обработки остаются теми же, что и при соответствующих операциях механической обработки. Допуски на ремонтные размеры вала и отверстия остаются теми же, что и на номинальные размеры, так как их размеры находятся в тех же размерных интервалах. Характер сопряжения (посадка) деталей при этом восстанавливается до заданного значения предприятием-изготовителем.

Обработка деталей под ремонтные размеры нашла широкое применение при восстановлении деталей (15...30 %) по причинам простоты технологического процесса и применяемого оборудования, высокой технико-экономической эффективности, а также возможности повторного (многократного) восстановления детали. Недостатки – нарушение взаимозаменяемости – основы современного машиностроительного производства. Недостатками являются также сложность комплектования и подбора и увеличение складских запасов, что приводит к замораживанию больших средств или увеличению времени на доставку деталей. Кроме того, для дефектации и контроля необходим большой набор предельных калибров.

## **8.2. Восстановление деталей постановкой дополнительного элемента (дополнительных ремонтных деталей)**

Сущность способа заключается в постановке дополнительного элемента для компенсации износа рабочих поверхностей деталей, а также при замене изношенной или поврежденной части детали.

Для компенсации износа рабочих поверхностей дополнительный элемент устанавливают непосредственно на изношенную поверхность детали. Этим способом восстанавливают изношенные посадочные отверстия под подшипни-

ки в картерах коробок передач, задних мостах, ступицах колес, изношенные резьбовые отверстия и другие поверхности. В зависимости от восстанавливаемой поверхности дополнительный элемент может иметь форму втулок, гильз, пластин, спиралей, ввертышей (рис. 16).

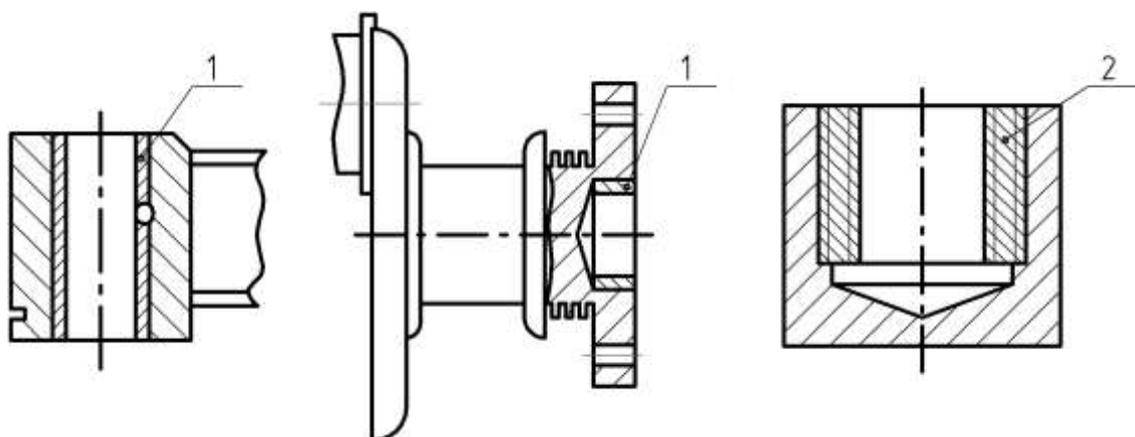


Рис. 16. Восстановление деталей постановкой дополнительных элементов:  
1 – втулка; 2 – ввертыш

При износе или повреждении отдельной поверхности детали сложной формы поврежденную часть детали удаляют и на ее место устанавливают заранее подготовленный дополнительный элемент. Например, блок шестерен заднего хода восстанавливают заменой зубчатых венцов. Для этого производят местный отжиг венца токами высокой частоты, затем срезают его на токарном станке. На обработанную поверхность напрессовывают новый зубчатый венец и приваривают его (рис. 17).

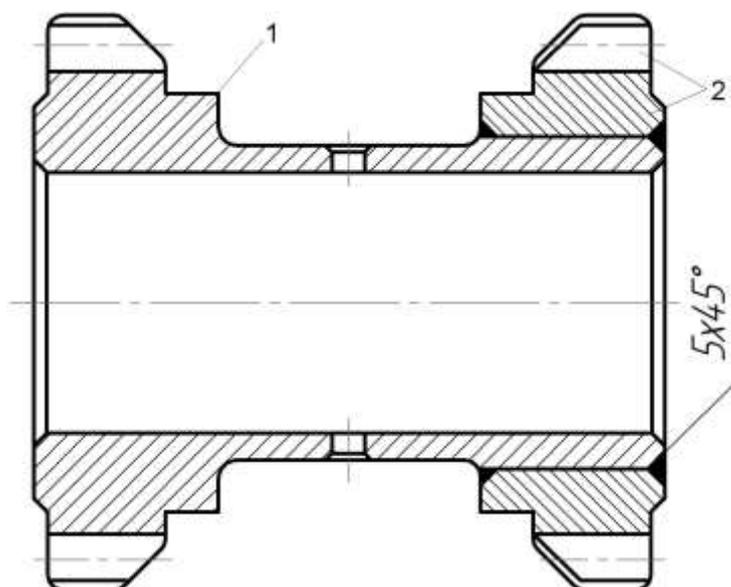


Рис. 17. Восстановление блока шестерен коробки передач постановкой зубчатого венца: 1 – шестерня; 2 – венец

Обычно дополнительный элемент и восстанавливаемую деталь изготавливают из одного и того же материала. Рабочая поверхность дополнительного

элемента должна обладать теми же свойствами, что и восстанавливаемая поверхность детали. Поэтому в случае необходимости дополнительный элемент должен подвергаться соответствующей термической обработке.

ДРД крепят на восстанавливаемых поверхностях: натягом, деформированием материала, сваркой, приклеиванием, пайкой, заклепками, силами упругости и упорами (на шейках валов), винтами, штифтами и навинчиванием по резьбе, выполненной на теле детали.

После постановки и закрепления дополнительного элемента производят их окончательную механическую обработку до требуемых размеров.

Восстановление деталей постановкой дополнительного элемента является надежным и общедоступным способом. Однако способ является сложным и дорогим, так как необходимо предварительно обрабатывать изношенную поверхность детали, изготавливать дополнительный элемент, который после постановки и крепления необходимо вновь подвергать окончательной обработке. Кроме того, снижается прочность деталей класса валов, особенно работающих при знакопеременных нагрузках. Применение способа ограничивается и по конструктивным соображениям из-за отсутствия необходимой толщины тела детали.

## **9. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Применяют для восстановления расположения, формы, размеров и шероховатости поверхностей и физико-механических свойств детали за счет перемещения материала в объеме самой детали от свободных поверхностей на изношенные. Способ применяют в основном для пластичных материалов (стали, меди, бронзы и др.).

Пластическую деформацию деталей производят **в холодном и горячем состоянии**. При обработке деталей в холодном состоянии пластическая деформация происходит за счет сдвига отдельных частей кристаллов металла (искажение кристаллической решетки) относительно друг друга. При этом в деформированных слоях металла изменяются физико-механические свойства: пластичность металла понижается, а предел прочности и твердость металла повышаются. Такое явление называют наклепом. Последующий нагрев детали до температуры 200...300 °С ведет к снятию искажений кристаллической решетки. Прочность и твердость наклепанного металла при этом частично снижаются, а пластичность повышается.

Пластическая деформация деталей в холодном состоянии требует приложения значительных усилий, поэтому для облегчения пластического деформирования деталь предварительно нагревают. Сопротивление деформированию стали, нагретой до температурыковки (800...1200 °С), в 10...15 раз меньше, чем сопротивление в холодном состоянии. Температура нагрева деталей должна быть небольшой, но достаточной для деформации детали. Нагрев детали до ковочной температуры приводит к выгоранию углерода с поверхностного слоя, возникновению окалины и короблению детали, поэтому такой нагрев целесообразен только для значительных пластических деформаций. Детали из углеродистых сталей нагревают в интервале 350...700 °С.

Восстановление размеров элементов деталей пластическим деформированием включает подготовку детали, нагрев (при необходимости), приложение деформирующего усилия и последующую обработку.

Для восстановления деталей в горячем состоянии применяют молоты, а для холодного деформирования используют прессы.

Достоинствами способа являются простота технологического процесса и применяемого оборудования, незначительная трудоемкость, отсутствие вложения дополнительного материала в деталь, удовлетворительное качество ремонта, низкая стоимость. К недостаткам относится некоторое снижение механической прочности детали, нарушение термообработки при нагреве, затраты на нагрев и последующую термообработку, возможность появления трещин.

### **9.1. Способы восстановления деталей объемным пластическим деформированием**

Процессы перемещения материала при пластическом деформировании классифицируют в зависимости от соотношения направления внешних сил и деформаций и вида применяемой энергии.

По соотношению направлений внешних сил и деформаций различают основные способы восстановления размеров деталей: осадку, раздачу, обжатие, вытяжку и вдавливание (рис. 18).

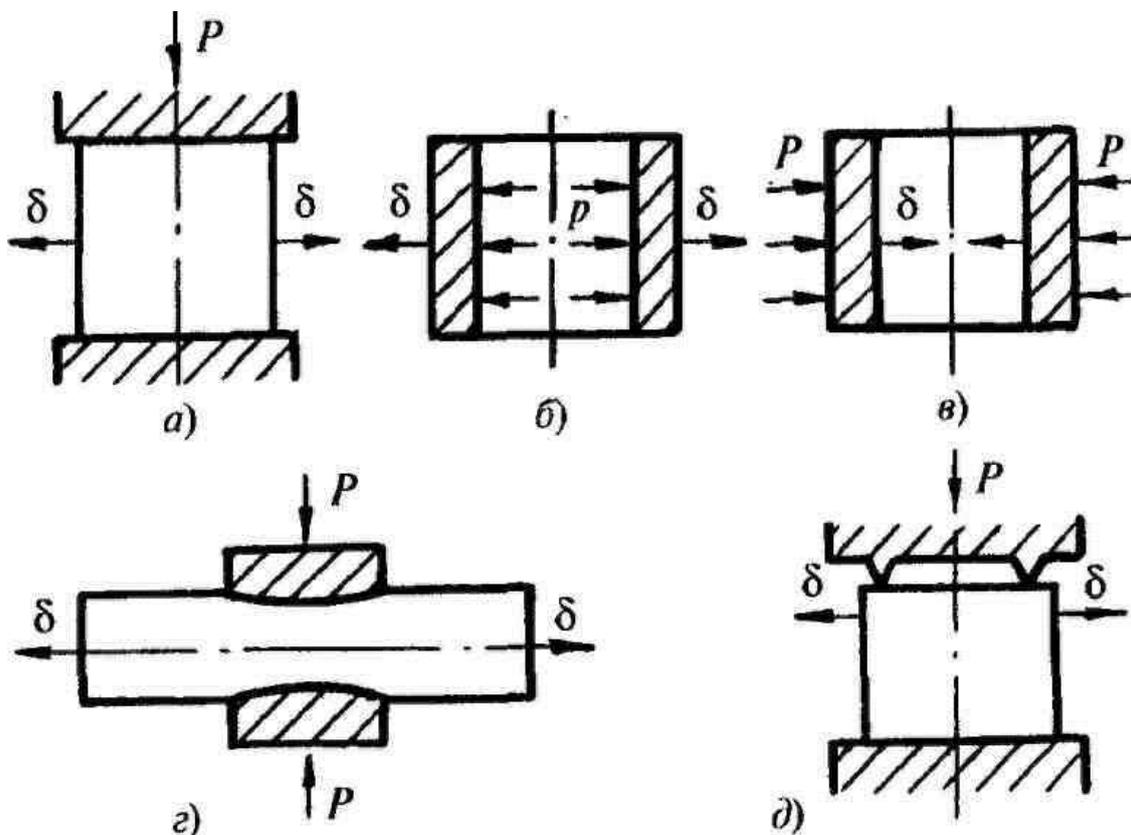


Рис. 18. Способы восстановления размеров деталей:

а – осадка; б – раздача; в – обжатие; г – вытяжка; д – вдавливание

Осадкой восстанавливают изношенные по наружному диаметру сплошные и полые детали и изношенные отверстия полых деталей за счет уменьшения их длины (рис. 19). При этом направление действующей силы  $P$  не совпадает с направлением требуемой деформации  $\delta$ . Осадку применяют при восстановлении шлицевых концов полуосей, толкателей клапанов, втулок из цветных металлов и других деталей.

Втулки из цветных металлов восстанавливают в холодном состоянии в специальных приспособлениях (рис. 19, б). Для сохранения во втулках выточек, канавок, отверстий в них устанавливают вставки соответствующих форм и размеров. В изношенную втулку  $3$  вставляют специальный палец, диаметр которого на  $0,2$  мм меньше диаметра окончательно обработанного отверстия. Давлением прессы втулка осаживается, заполняя весь зазор между пальцем и изношенной поверхностью. Затем производят механическую обработку отверстия втулки под требуемый размер.

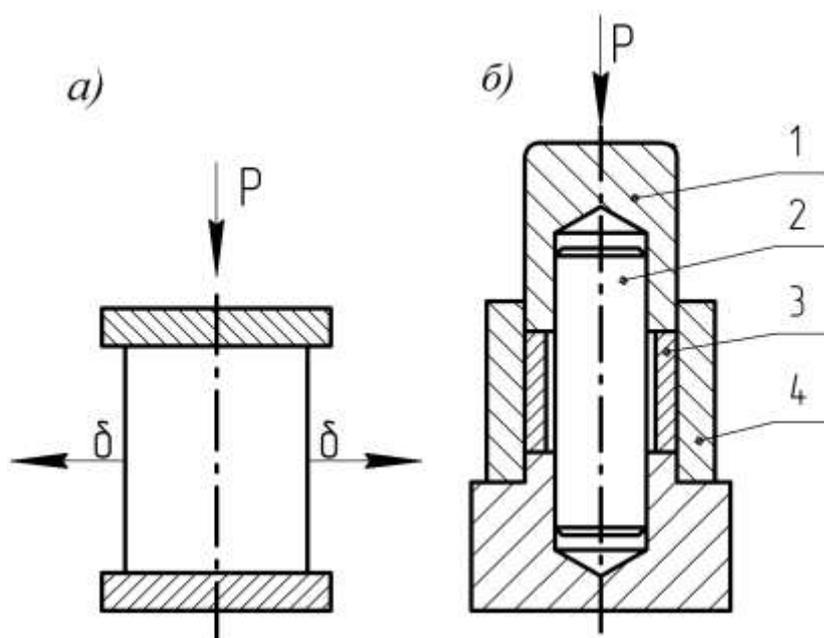


Рис. 19. Осадка: *а* – схема обработки; *б* – приспособление для осадки втулок; 1 – пуансон; 2 и 4 – оправки; 3 – восстанавливаемая деталь

**Раздачей** восстанавливают наружные поверхности полых деталей за счет направленного перемещения металла от отверстия к периферии. Направление действующей силы совпадает с направлением деформации (рис. 20).

Раздачей обрабатывают поршневые пальцы, шипы крестовины кардана, посадочные поверхности чашек коробки дифференциала, наружные цилиндрические поверхности под подшипники труб полуосей. Раздачу производят в холодном состоянии сферическими прошивками, шариками (рис. 20, *б*), пуансонами, вращающимися дорнами (рис. 20, *в*).

Эффективным процессом восстановления поршневых пальцев является **гидротермическая раздача**. Сущность ее заключается в том, что поршневые пальцы нагревают токами высокой частоты до температуры 790...860 °С, а затем, зажимая его по торцам, быстро охлаждают потоком воды, пропускаемой через внутреннюю полость пальца. При этом наружный диаметр пальца увеличивается до размера, достаточного для компенсации износа и создания припуска на шлифование.

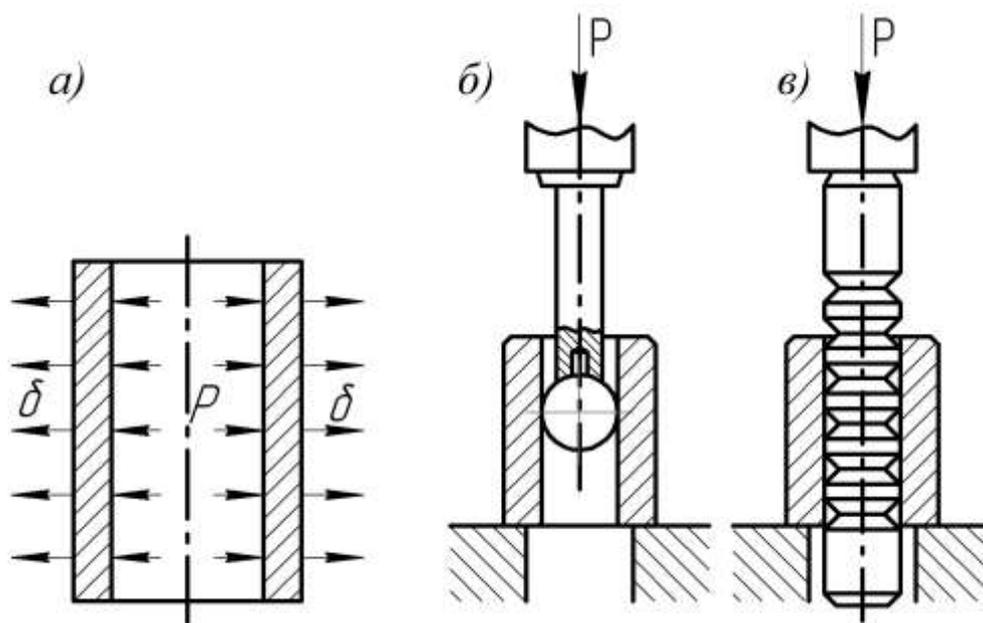


Рис. 20. Раздача: *а* – схема обработки; *б* – раздача шариком; *в* – раздача цилиндрической оправкой

**Обжатием** восстанавливают изношенные отверстия полых деталей за счет перемещения металла от периферии к центру. Направление действующей силы совпадает с направлением требуемой деформации (рис. 21).

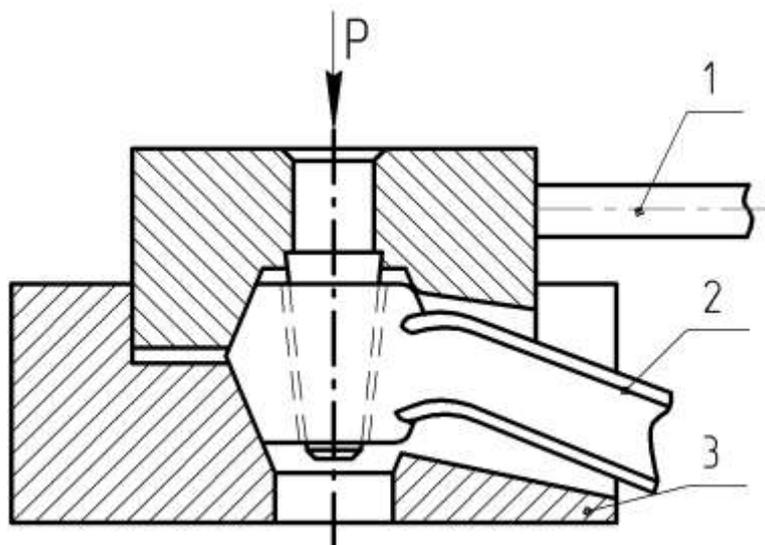


Рис. 21. Обжатие

Обжатием восстанавливают втулки из цветных металлов, отверстия в рулевых сошках и рычагах поворотных цапф, внутренние зубья и шлицы во фланцах и муфтах, сепараторы роликовых подшипников и другие детали.

При восстановлении конусного отверстия в бобышке рулевой сошки ее нагревают до температуры 900...950 °С и помещают в нижнюю обжимку 3 специального приспособления (рис. 21). Верхняя обжимка 1 имеет конусный палец, который входит в отверстие бобышки рулевой сошки 2. Давлением прессы верхняя обжимка перемещается до упора в нижнюю обжимку 3. Бобыш-

ка рулевой сошки обжимается, заполняя весь зазор между пальцем и изношенным отверстием. После обжатия рулевую сошку подвергают термической обработке, зачищают торцы бобышки и развертывают конусное отверстие до необходимого размера.

Изношенные по внутреннему диаметру гильзы цилиндров восстанавливают до нормальных размеров **термопластическим обжатием**.

Изношенную гильзу цилиндров 2 (рис. 22) устанавливают в матрицу 4 и с помощью индуктора 1 нагревают токами высокой частоты до температуры 840...880 °С. При этом матрица интенсивно охлаждается с помощью спрейера 3 водой. Вследствие ограничения свободного расширения в гильзе цилиндров при ее нагреве и охлаждении растут температурные напряжения. При достижении определенной их величины в радиальном направлении начинают развиваться пластические деформации, которые увеличиваются с повышением температуры.

При свободном остывании размеры гильзы цилиндров уменьшаются как в осевом, так и в радиальном направлениях. Уменьшение диаметра гильзы цилиндров зависит от толщины ее стенки, материала, температуры и скорости нагрева, интенсивности охлаждения и других факторов. Максимальная деформация в окружном направлении за один цикл составляет 0,75...1,0 мм.

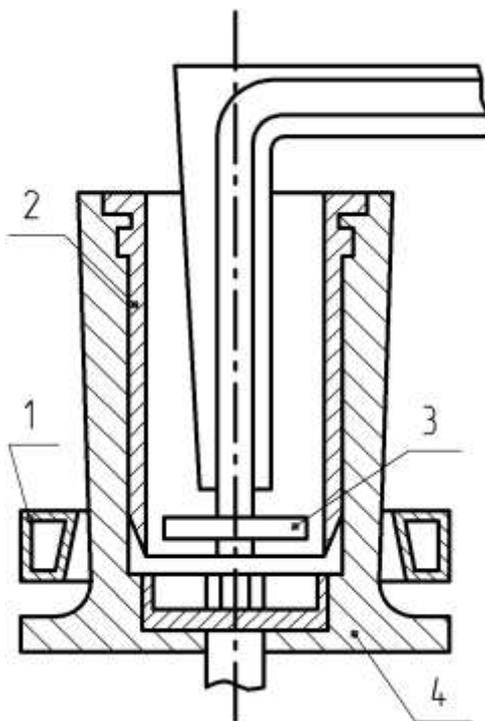


Рис. 22. Схема термопластического обжатия гильзы

**Вдавливание** применяется для увеличения размеров изношенных наружных поверхностей за счет перемещения металла из ограниченного участка ее нерабочей поверхности. Направление действующей силы не совпадает с направлением требуемой деформации (рис. 23).

Вдавливанием восстанавливают зубья шестерен, шлицы на валах по толщине. Изношенные шлицы восстанавливают по толщине на специальной уста-

новке путем проталкивания восстанавливаемого вала между роликами, свободно вращающимися на осях (рис. 23, б). Перед пластической деформацией шлицевую часть нагревают ТВЧ. Вдавливание роликов обеспечивает припуск в пределах 0,20...0,25 мм на сторону. Затем после наружного точения производят фрезерование шлицев на шлицефрезерном станке с последующей термической обработкой шлицевой части.

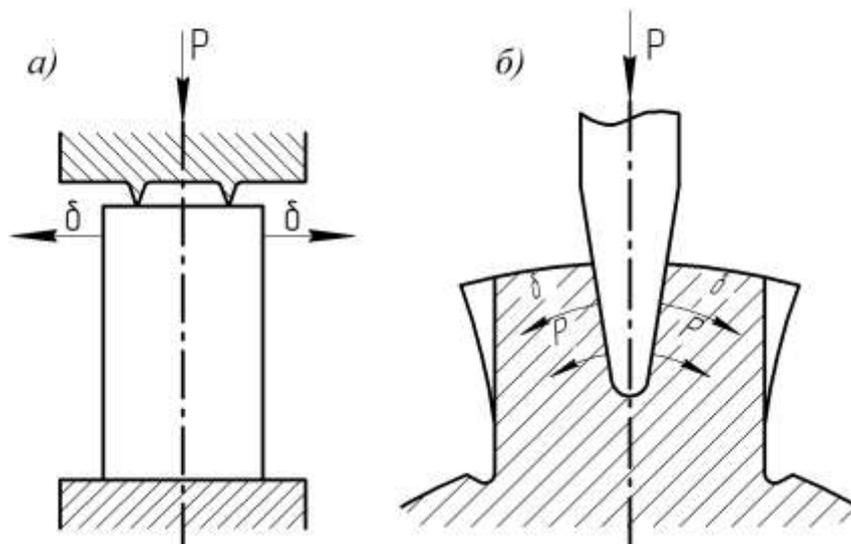


Рис. 23. Вдавливание: а – схема обработки; б – приспособление для восстановления шлицев

**Вытяжкой** увеличивают длину детали за счет местного сужения ее поперечного сечения на небольшом участке. Направление действующей силы не совпадает с направлением требуемой деформации (рис. 24). Вытяжкой удлиняют стержни, тяги, штанги, шатуны.

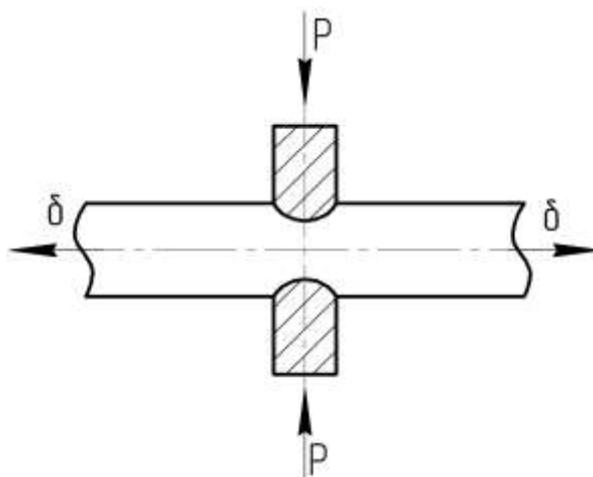


Рис. 24. Вытяжка

**Накатку** применяют для увеличения наружных и уменьшения внутренних размеров деталей за счет вытеснения металла из восстанавливаемой изношенной поверхности (рис. 25).

Поверхности накатывают специальным инструментом – зубчатым роли-

ком (накатником) с прямыми или косыми зубьями. Применяют для деталей, которые воспринимают контактную нагрузку меньше 7 МПа.

Накаткой восстанавливают шейки валов под неподвижную посадку шариковых (роликовых) подшипников и др. Высота подъема металла на сторону не должна превышать 0,2 мм, а уменьшение опорной поверхности 50 %.

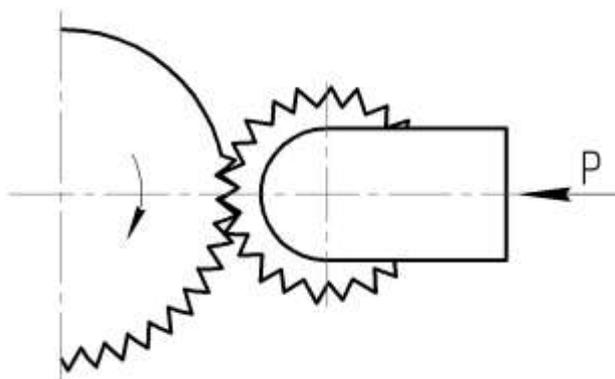


Рис. 25. Накатка

**Правку** применяют для устранения изгиба, скручивания и коробления, возникающих в процессе эксплуатации деталей, т. е. погрешностей формы. Размеры деталей с помощью правки не восстанавливаются. Правке подвергают коленчатые и распределительные валы, клапаны, шатуны, полуоси, балки передних осей, детали рамы, тяги и другие детали.

Применяют правку **статическим нагружением и наклепом**. В зависимости от размера и конструкции детали правку производят в холодном состоянии и с нагревом. При холодной правке в деталях возникают внутренние напряжения, которые в процессе последующей работы детали могут суммироваться с внешними нагрузками, действующими на нее. Это может вызвать повторную деформацию детали.

Для повышения качества холодной правки деталей применяют различные приемы. Это выдержка под прессом в течение длительного времени или двойная правка, заключающаяся в первоначальном перегибе детали с последующей правкой в обратную сторону. Лучшие результаты дает стабилизация правки детали последующей термической обработкой. Для всех ответственных деталей, которые подвергались окончательной термической обработке при температуре выше 500 °С, нагрев должен производиться до температуры 400...450 °С с последующей выдержкой в течение 0,5...1,0 ч. Допускается также нагрев деталей до температуры 200...250 °С с увеличением времени выдержки. При больших деформациях деталей из стали, а также при правке деталей из чугуна рекомендуется производить термообработку с подогревом до температуры 600...800 °С.

Горячая правка производится при температуре 600...800 °С для устранения больших деформаций детали. Если горячей правке подвергались термически обработанные детали, то после правки их необходимо вновь термически обработать.

При правке статическим нагружением детали укладывают на призмы или подставки так, чтобы наибольший прогиб находился посередине и был обращен

к штоку прессы (рис. 26). Детали сложной конфигурации правят в специальных приспособлениях.

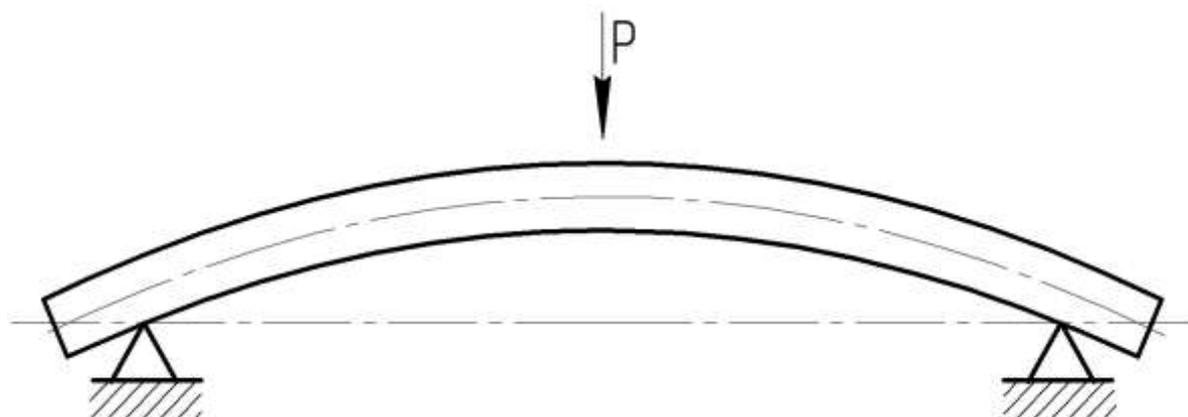


Рис. 26. Схема восстановления деталей правкой статическим нагружением

Правку **поверхностным наклепом** производят пневматическим молотком с закругленным бойком для нанесения ударов на вогнутой стороне детали (рис. 27). В процессе наклепа поверхностные слои металла вытягиваются и вызывают обратный прогиб.

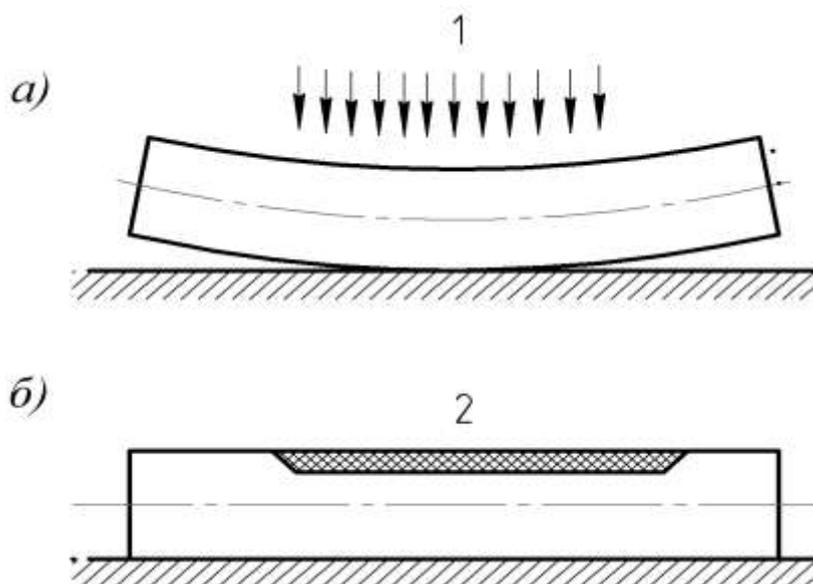


Рис. 27. Схема правки поверхностным наклепом: *а* – до наклепа; *б* – после наклепа; 1 – поверхностный наклеп; 2 – наклепанный слой

Для правки коленчатого вала наклепом его устанавливают в призмы приспособления и пневматическим молотком с угловым бойком наносят удары по соответствующей щеке коленчатого вала в зависимости от направления прогиба (рис. 28).

Правка наклепом по сравнению с правкой статическим нагружением имеет ряд достоинств: повышается производительность процесса, обеспечивается более высокая точность и не снижается усталостная прочность детали.

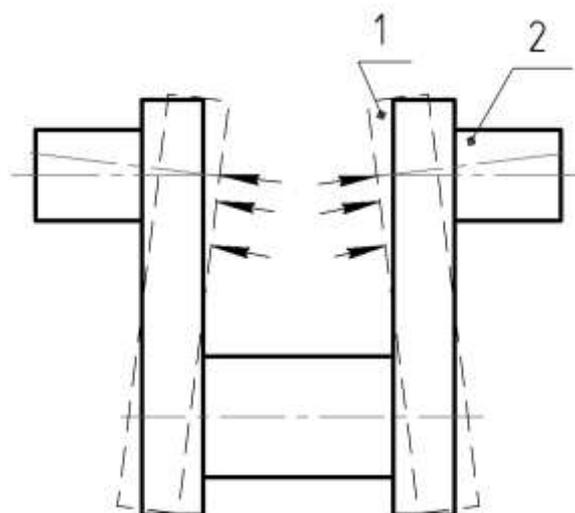


Рис. 28. Схема правки коленчатого вала наклепом:  
1 – до правки; 2 – после правки

## 9.2. Способы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД)

Большинство деталей работают в условиях, при которых эксплуатационная нагрузка (давление, нагрев, действие окружающей среды и т.п.) воспринимаются главным образом их поверхностным слоем.

ППД – это обработка деталей давлением (без снятия стружки), при которой пластически деформируется только их поверхностный слой.

Осуществляется инструментом, деформирующие элементы (ДЭ) которого (шарики, ролики или тела иной конфигурации) взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью по схемам качения, скольжения или внедрения (рис. 29).

На этих элементарных схемах или их сочетании основаны все методы ППД.

ППД может осуществляться путем **упругого** поджатия ДИ к детали с фиксированной силой, а также путем его **жесткого** закрепления для создания определенного натяга.

**Упругая схема** практически не изменяет размерную точность деталей. Деформирующие инструменты прижимаются к поверхности детали с постоянным усилием и не участвуя в процессе размерообразования. Изменение диаметра происходит лишь в пределах величины смятия микронеровностей. Поэтому применяется, когда требования к точности детали выполнены на предыдущих операциях изготовления.

**Жесткая схема** предполагает обработку с заданным натягом ДИ. Она повышает точность на **10–15 %**, однако чувствительна к колебанию припуска, которое приводит к изменению заданного натяга и неравномерной пластической деформации. В результате обработки создается неравномерно упрочненный ПС детали, что сдерживает применение такой схемы установки.

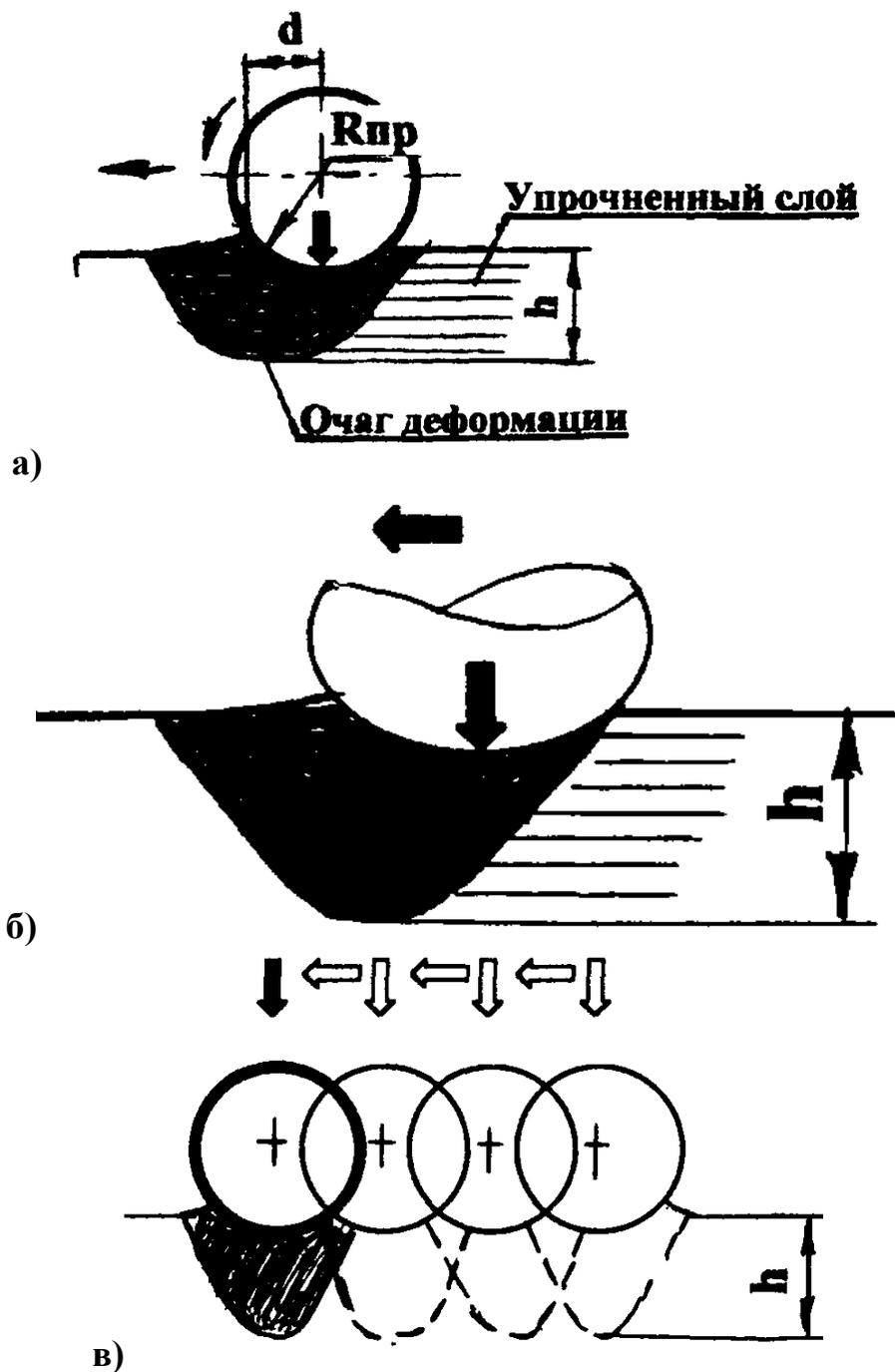


Рис. 29. Основные схемы взаимодействия ДЭ с обрабатываемой поверхностью:  
 а) – качение; б) – скольжение; в) – внедрение;

Метод ППД в условиях качения (рис. 29, а) или скольжения (рис. 29, б) основан на пластическом волнообразовании. При обработке по схеме качения ДИ, контактируя с поверхностью детали, перемещается относительно нее, вращаясь вокруг своей оси. При внедрении в зоне контакта возникает ассиметричный очаг деформации (ОД) (рис. 30), характеризуемый передней внеконтактной поверхностью пластической волны ( $ABC$ ), поверхностью контакта ( $CDE$ ), а также задней внеконтактной поверхностью ( $EF$ ).

Вследствие деформации частицы металла в ОД перемещаются вдоль некоторых линий тока (ЛТ), формируя упрочненный слой некоторой толщины (рис. 30).

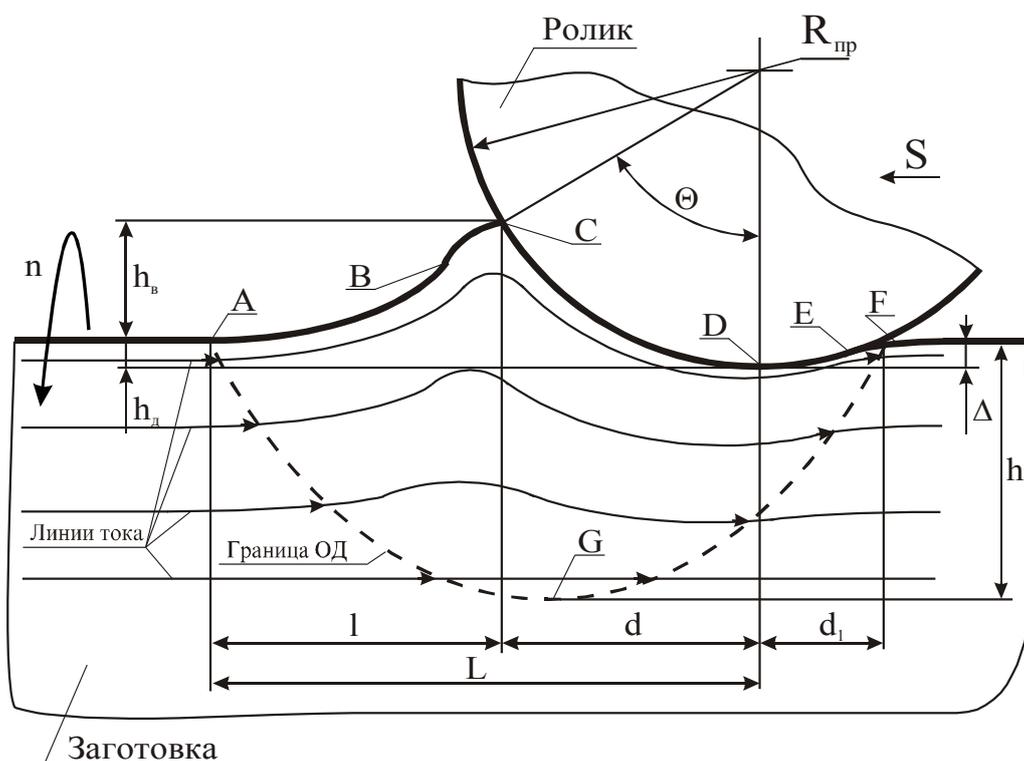


Рис. 30. Схема обработки ППД

ОД перемещается вместе с инструментом, благодаря чему поверхностный слой последовательно деформируется на глубину  $h$ , равную глубине распространения ОД.

Геометрические размеры и кривизна поверхностей ОД определяются свойствами обрабатываемого материала, а также параметрами режима: профильным радиусом  $R_{пр}$  и величиной действительного внедрения ролика  $h_d$ , в меньшей степени подачей  $S$  и скоростью обработки  $V$ .

От параметров режима зависит интенсивность пластической деформации поверхностного слоя и как результат – качественные изменения в нем:

- снижение шероховатости поверхности, за счет сглаживания микронеровностей;
- повышение твердости, предела текучести металла;
- возникновение сжимающих остаточных напряжений;
- накопление деформации и снижение запаса пластичности.

Величина действительного внедрения ДИ при ППД не превышает **0,05–0,1 мм**. При больших значениях  $h_d$  полностью исчерпывается запас пластичности и происходит разрушение металла в районе вершины пластической волны (точка  $C$  на рис. 30) и, как следствие, обработанной поверхности. По этой причине ППД не позволяет осуществлять обработку с большими натягами и получать большую глубину и степень упрочнения ПС.

При перенаклепе в поверхностном слое появляются опасные микротрещины, образуются частички отслаивающегося металла, поверхностные зерна сплющиваются так, что становятся почти неразличимыми. Резко увеличивается шероховатость. Если наклеп металла можно частично или полностью снять путем отжига, то перенаклеп – необратимый процесс, при котором нагрев не вос-

становливают исходную структуру металла и его механические свойства.

Для множества разновидностей ППД (статическое, ударное, вибрационное, ультразвуковое, гидравлическое, пневматическое, калибрующее и др.) общим является принцип взаимодействия индентора (деформирующего инструмента) с пластическим полупространством (обрабатываемой деталью).

Наиболее значимыми параметрами, влияющими на качество ПС, являются нормальное усилие  $P$  (в случае жесткой схемы – натяг  $h_d$ ) и профильный радиус ролика  $R_{np}$ .

**Методы статического поверхностного деформирования.** Характерным признаком является стабильность формы и размеры ОД в стационарной фазе процессе.

По ГОСТ 18296-72 ППД при качении инструмента (рис. 29, а) по поверхности называется **накатыванием**. В свою очередь подразделяется на **обкатывание** и **раскатывание**, в зависимости от того, какие поверхности обрабатываются: выпуклые (валы, галтели), плоские или вогнутые (например, отверстия).

К методам ППД по схеме скольжения (рис. 29, б), относятся **выглаживание** и **дорнование**. В этих процессах ДЭ должны изготавливаться из материалов, имеющих высокую твердость (алмаз, твердый сплав и т. п.) и не склонных к адгезионному схватыванию с обрабатываемым материалом.

**Выглаживание** применяется для ППД закаленных сталей и деталей маложестких, т. е. тогда, когда невозможно применить обработку накатыванием. Недостатком является низкая производительность и невысокая стойкость инструмента.

**Дорнование** (синонимы: деформирующее протягивание, калибрование) применяется для обработки отверстий. Это высокопроизводительный процесс, сочетающий в себе возможности чистовой, упрочняющей, калибрующей и формообразующей обработки. Формообразующая обработка применяется для получения на поверхности детали мелких шлицов, резьбы и других рифлений. Толщина упрочненного слоя при дорновании регулируется натягом, т. е. разностью диаметров ДЭ и отверстия. При определенных соотношениях натяга и толщины стенки пластическая деформация может привести к раздвигу цилиндра по диаметру, в связи с чем произойдет калибрование отверстия.

При **динамических (ударных)** методах инструмент внедряется в поверхностный слой детали (рис. 29, в) перпендикулярно профилю поверхности или под некоторым углом к ней. Многочисленные удары, наносимые инструментом по детали по заданной программе или хаотично, оставляют на ней большое число локальных пластических отпечатков, которые в результате покрывают (с перекрытием или без него) всю поверхность. Размеры очага деформации зависят от материала детали, размеров и формы инструмента и от энергии удара по поверхности.

К методам **ударного ППД** относятся **чеканка, обработка дробью, виброударная, ультразвуковая, центробежно-ударная** обработки и др.

Инструментами при ППД могут быть ролик, шар с принудительной осью вращения или без нее, гладилка, дорн с нережущими кольцами, боек-чекан

и т. д. В качестве рабочих тел используются дробь, шарики из стали, стекла, пластмассы и др. Рабочей средой может быть жидкость, газ и их суспензии с частицами абразива.

Диапазон режимов ППД приведен в таблице 1.

Таблица 1

Диапазоны варьирования параметров режима ППД

Параметр	Обозначение	Диапазон значений
Подача	$S, \text{ мм/об}$	0–0,7
Диаметр детали	$D_d, \text{ мм}$	от 10
Диаметр ролика, шарика	$D_p, \text{ мм}$	10–100
Частота вращения детали	$n, \text{ об/мин}$	100–1200
Скорость обработки	$V, \text{ м/мин}$	14–180
Профильный радиус ролика	$R_{np}, \text{ мм}$	1,6–16
Усилие деформирования	$P, H$	20–3000
Действительный натяг ролика	$h_d, \text{ мм}$	до 0,05 (0,1)
Исходная шероховатость детали	$Rz_{исх}, \text{ мкм}$	8,1–141,6

#### Достоинства:

- сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура в поверхностном слое;
- отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности частичками абразива;
- отсутствуют термические дефекты;
- можно достигать минимального параметра шероховатости поверхности как на термически необработанных сталях, цветных сплавах, так и на высокопрочных материалах, сохраняя исходную форму заготовок за один рабочий ход;
- можно образовывать регулярные микрорельефы с заданной площадью углублений для задержания смазочного материала;
- создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое;
- плавно и стабильно повышается микротвердость поверхности.

Указанные и другие преимущества методов ППД обеспечивают повышение износостойкости, сопротивления усталости, контактной выносливости и других эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей на 20–50 %, а в некоторых случаях – в 2–3 раза.

#### Недостатки:

- подавляющее большинство методов ППД не повышает геометрической точности поверхности, обычно сохраняется точность, достигнутая на предшествующей операции;
- в связи с созданием полезных сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое при обработке тонкостенных и неравножестких деталей (толщиной 3–5 мм) может происходить деформация поверхности 5–10 мкм и

более;

- в связи с пластическим течением металла при использовании некоторых методов обработки ППД на кромках обрабатываемых поверхностей образуются равномерные наплывы металла толщиной 0,03–0,3 мм.

**ППД шаровым инструментом.** Инструмент можно классифицировать по следующим признакам:

1) по характеру обрабатываемых поверхностей: для наружных цилиндрических, для внутренних цилиндрических и для плоских;

2) по числу деформирующих элементов: одношаровой и многошаровой;

3) по характеру создания деформирующей силы: упругий и жесткий.

Шаровой инструмент применяют для обработки специальных или сложнопрофильных поверхностей: сфер, галтельных переходов, желобов подшипников и т. д.

Особенности шаровых устройств:

- использование стандартных шаров с высокими точностью обработки и качеством поверхности;

- отсутствие материальной оси вращения шаров и самоустанавливаемость их относительно обрабатываемой поверхности под действием сил обкатывания и трения;

- отсутствие или незначительность проскальзывания шаров;

- незначительные силы обработки, связанные с точечным (условно) контактом инструмента и обрабатываемой поверхности;

- меньшая подача и производительность обработки, чем при использовании роликовых устройств.

Область рационального применения шаровых устройств – обработка маложестких и неравножестких деталей, в том числе деталей с высокой поверхностной твердостью.

**Алмазное выглаживание** заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – выглаживателем. Инструмент раздвигает металл, образуя канавку на поверхности. При этом создаются 3 вида очагов деформирования в зависимости от соотношения глубин внедрения инструмента и исходных параметров шероховатости.

После каждого оборота обрабатываемой детали канавка – след выглаживателя – перемещается в осевом направлении на расстояние, равное подаче  $S$ , происходит многократное перекрытие ее при последующих оборотах обрабатываемой детали, так как ширина канавки больше подачи.

Параметры режима: радиус инструмента до 1,5 мм, сила выглаживания 50–1000 Н, натяг (по жесткой схеме) – 3–7 мкм.

Выглаживание также бывает жесткое и упругое. Жесткое не получило широкого распространения вследствие малых допусков на биения и геометрическую форму детали, а также высоких требований к жесткости системы СПИД.

**Совмещенные способы ППД.** Совмещенная обработка (СО) осуществляется путем концентрации операций в одной наладке, что уменьшает машинное время, существенно повышая производительность труда. В то время как

**комбинированная обработка** – это применение одного способа после другого.

Самым простым способом СО является обработка резанием и ППД, которая бывает 3-х типов: Резание – ППД; ППД – резание; Резание – ППД – резание.

2-й вариант предназначен для облегчения процесса резания при обработке труднообрабатываемых материалов – высоколегированных сталей и сплавов за счет предварительного упрочнения.

3-й вариант является развитием 2-го и обеспечивает помимо роста производительности и повышения стойкости режущего инструмента высокое качество поверхностного слоя, свойственное ППД.

Особенностью указанных совмещенных методов является независимая работа инструментов. Несмотря на их совмещение, инструменты во время работы не оказывают друг на друга значительного влияния. Геометрическая точность совмещенной обработки по сравнению с комбинированным точением и ППД повышается на **10–15 %** за счет того, что деформирующие ролики помимо функции обкатывания выполняют роль подвижного люнета, увеличивая тем самым размерную точность путем улучшения условий работы резца.

#### **Недостатки СО:**

1. Износ резца пропорционально отражается на размере обрабатываемой детали и последующая обработка роликами не решает этой проблемы ни в случае упругого, ни в случае жесткого их закрепления.

2. Невысокая способность к исправлению исходной погрешности заготовки при обкатывании жестко закрепленными деформирующими инструментами и отсутствие таковой при их упругом закреплении.

3. Повышение точности совмещенной обработки ППД возможно путем увеличения жесткости закрепления и натяга деформирующих инструментов. Однако колебания припуска, вызванные геометрической погрешностью заготовки, и особенности волнообразования процессов ППД существенно ограничивают указанные возможности.

4. Невозможность установки различных режимов обработки для режущего и деформирующего инструментов, и, как следствие, невозможность обеспечения оптимального режима обработки для каждого инструмента, обеспечивающего наилучшие поверхностные свойства.

В качестве прогрессивного способа СО рассмотрим размерное совмещенное обкатывание (PCO), основанное на оригинальной схеме взаимодействия режущего и деформирующего инструмента и осуществляется 2-мя или 3-мя обкатными роликами диаметром  $D_p$  и профильным радиусом  $R_{np}$ , жестко настроенными на размер обработки детали. Принципиальным является наличие в зоне волнообразования резцовой пластины, которая устанавливается с некоторым действительным зазором  $a_\delta$  между режущей кромкой и поверхностью заготовки и частично или полностью удаляет пластическую волну металла высотой  $h_\delta$  (заштрихованная область) (рис. 31).

Величина действительного натяга роликов существенно превышает принятые для традиционного ППД и может устанавливаться в широких пределах до  $h_\delta = 0,05–1,00$  мм. Однако при PCO разрушения поверхности не происходит,

потому что резец удаляет часть металла в районе вершины пластич. волны.

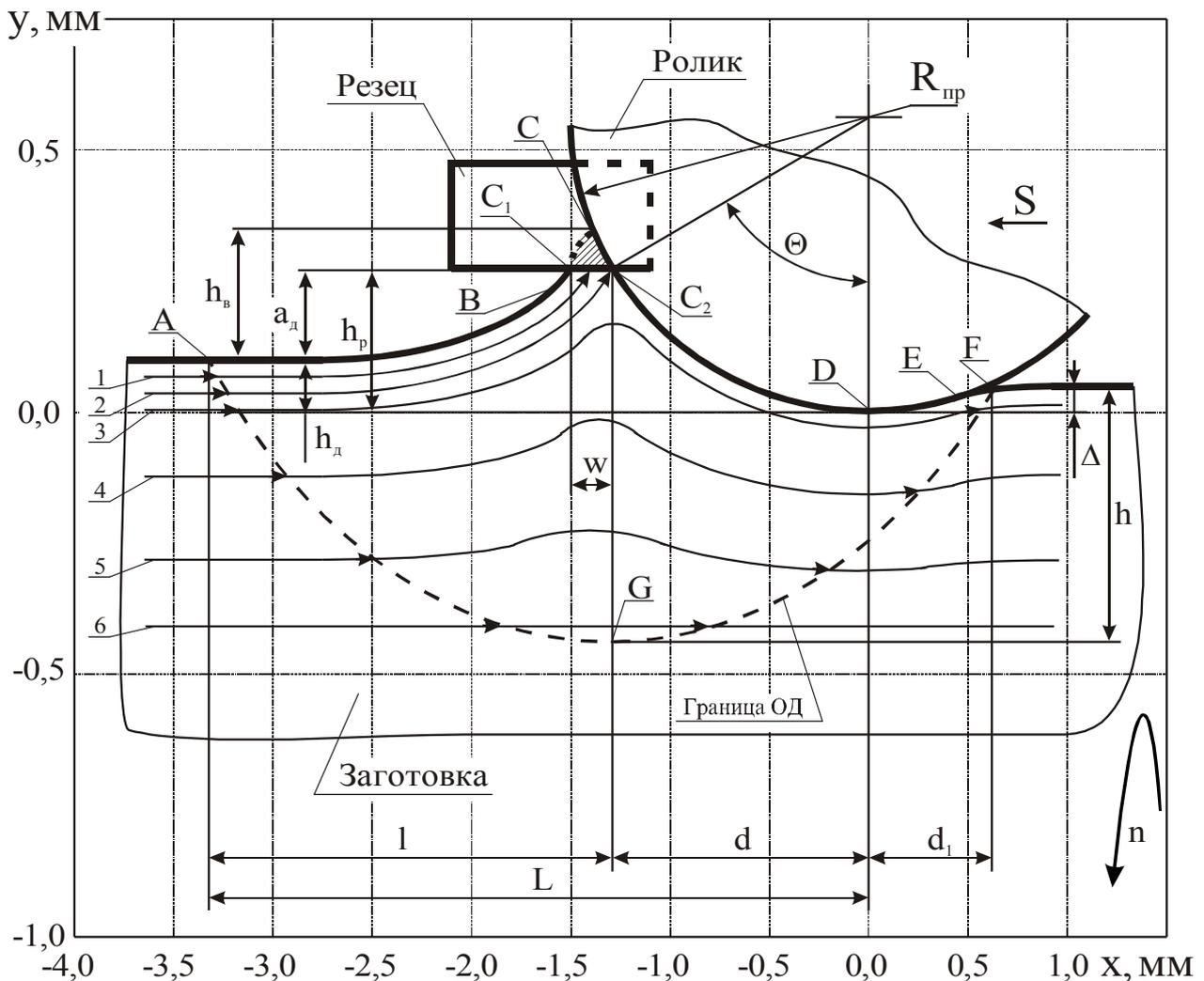


Рис. 31. Очаг деформации при обработке РСО (1-я схема)

Важным условием нормального протекания процесса РСО является надежное удаление стружки из рабочей зоны, поэтому продукты резания удаляются смазывающе-охлаждающей жидкостью, подаваемой под давлением в зону обработки.

При обработке РСО также возникает асимметричный ОД который отличается от ППД не только размерами, но и наличием поверхности в зоне контакта с резцом  $C_1C_2$ .

Передняя поверхность ОД от точки начала зарождения пластической волны до вершины ролика имеет общую длину  $L$ , состоящую из поверхности до точки встречи с роликом длиной  $l$  и передней контактной поверхности ролика длиной  $d$ . Упруго-пластическое восстановление металла  $\Delta$  за роликом образует заднюю поверхность  $DEF$  длиной  $d_1$ .

Разработаны 2 схемы РСО. При обработке по первой схеме резец настроен с некоторым зазором от поверхности. По 2-й схеме резец предварительно удаляет слой металла толщиной  $a$  и ролик или ролики оказываются автоматически установленными на равномерную величину  $h_d = h_p$  (рис. 32). Такая схема

целесообразна при обработке деталей, имеющих существенные погрешности исходных поверхностей, при этом обработка по первой схеме обеспечивает лучшее качество поверхности и меньший износ режущего инструмента.

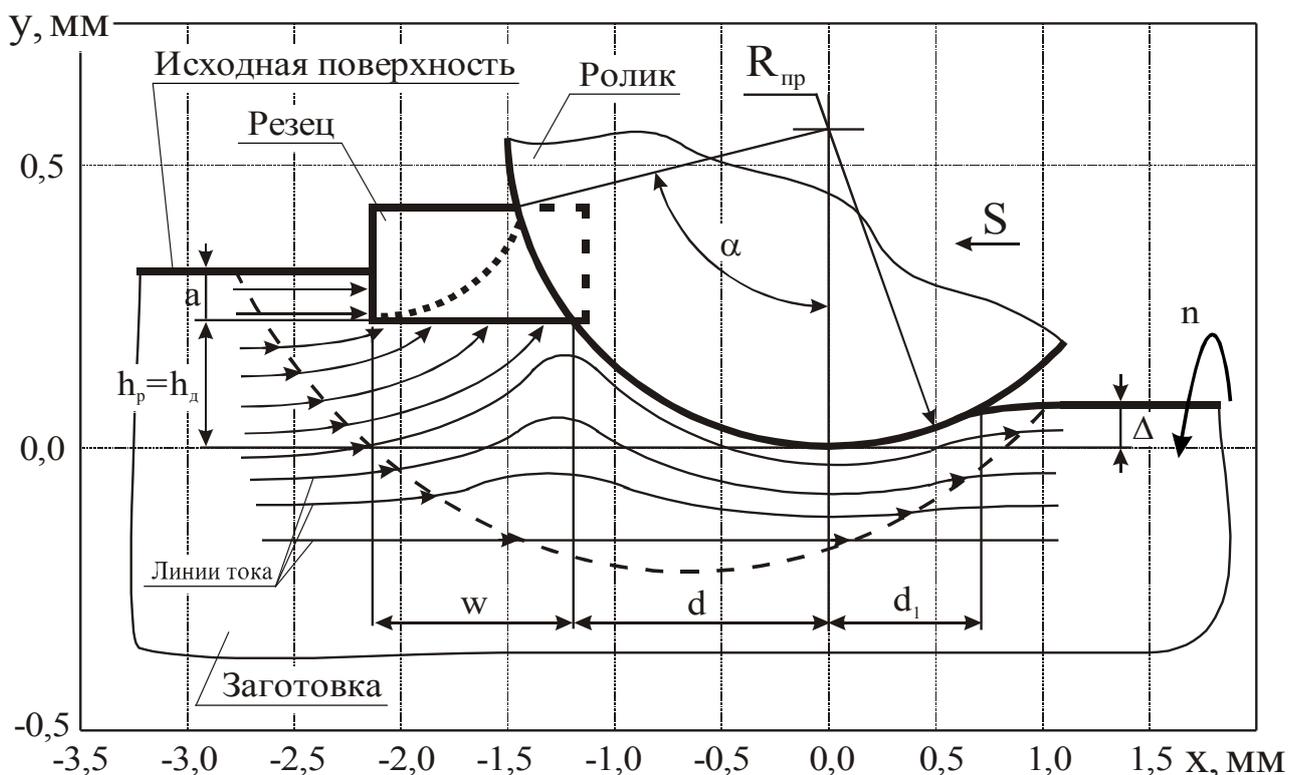


Рис. 32. 2-я схема размерного совмещенного обкатывания

Конструктивно инструменты жестко соединены и образуют замкнутый контур. Резец располагается между роликами в плоскости, перпендикулярной оси вращения детали и смещен относительно них на некоторый угол (на рис. 31 и 32 резец и ролик условно сведены в одну плоскость).

При обработке РСО высокие требования предъявляются ко всей технологической системе. Однако, несмотря на высокую жесткость системы СПИД, при обработке, тем не менее, возникают упругие отжатия элементов системы.

Функцию размерообразования при РСО, дополняя друг друга, выполняют оба инструмента, что обеспечивает точность размеров до 7-8 качества.

Обработка характеризуется следующими факторами (табл. 2):

- действительного зазора  $a_d$ ,
- натяг  $h_d$ ,
- образуемый их суммой расчетный натяг  $h_p$ ,
- профильный радиус ролика  $R_{пр}$ ,
- подача  $S$ ,
- диаметр обрабатываемой детали  $D_d$ ,
- диаметр роликов  $D_p$ ,
- скорость обработки  $V$ ,
- составляющие силы обработки  $P_x, P_y$  и др.

Наиболее значимые факторы, в наибольшей степени влияющие на тече-

ние процесса и качество ПС:  $a_d, h_d, h_p, R_{пр}$ .

Таблица 2

Диапазоны варьирования параметров режима РСО

<b>Параметр</b>	<b>Обозначение</b>	<b>Диапазон значений</b>
Подача	$S, \text{ мм/об}$	0,07–0,7
Диаметр детали	$D_d, \text{ мм}$	45
Диаметр ролика	$D_p, \text{ мм}$	60–80
Частота вращения детали	$n, \text{ об/мин}$	100–1200
Скорость обработки	$V, \text{ м/мин}$	14–180
Профильный радиус ролика	$R_{пр}, \text{ мм}$	2–15
Расчетный натяг	$h_p, \text{ мм}$	0,1–1,0
Действительный зазор	$a_d, \text{ мм}$	0–0,2
Действительный натяг ролика	$h_d, \text{ мм}$	0,05–0,9
Исходная шероховатость детали	$Rz_{исх}, \text{ мкм}$	8,1–141,6

## 10. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ НАНЕСЕНИЕМ МАТЕРИАЛА

### 10.1. Восстановление деталей методами сварки и наплавки

Эти методы восстановления деталей получили самое широкое распространение при ремонте (до 70 % восстанавливаемых деталей). Основной причиной этого является простота, дешевизна, возможность устранять с помощью этих методов самые различные типы дефектов.

**Сварка** – это процесс получения неразъемного соединения посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании или пластическом деформировании. Сваркой устраняют трещины, приваривают отломанные и дополнительные детали, заваривают изношенные отверстия и др.

**Наплавка покрытий** – это процесс нанесения покрытия из расплавленного материала на разогретую до температуры плавления поверхность восстанавливаемой детали.

Покрытия, полученные наплавкой, характеризуются отсутствием пор, высокими значениями модуля упругости и прочности на разрыв. Прочность соединения этих покрытий с основой соизмерима с прочностью материала детали.

В процессе сварки и наплавки возникают определенные технологические факторы, отрицательно влияющие на качество восстанавливаемой детали. К ним относятся:

- структурные изменения металла детали;
- появление внутренних напряжений;
- изменение химического состава металла детали.

**Структурные изменения** в материале детали вызываются термическим влиянием из-за сильного нагрева на границе сварочной ванны и основного металла детали. Характер этих изменений и размеры зоны термического влияния зависят от вида и режима сварки, химического состава свариваемых металлов, их начальной температуры и скорости охлаждения деталей. Чаще всего они приводят к изменению механических свойств детали, снижению твердости детали, нарушению термообработки. Размер зоны термического влияния при газовой сварке достигает 25...30 мм, а при электродуговой 2...6 мм. Чем больше мощность газовой горелки или выше сварочный ток, тем больше эта зона.

**Внутренние напряжения** появляются при сварке и наплавке деталей в результате их неравномерного нагрева, а также изменения объема металла. При нагреве и охлаждении возникают внутренние напряжения, а иногда и трещины. Для уменьшения внутренних напряжений применяют различные виды обработки. Это отжиг при температуре 600...850 °С с последующим охлаждением вместе с печью или отпуск при температуре около 400 °С с последующей выдержкой при этой температуре в течение 3 ч и охлаждением на воздухе, подогрев детали перед сваркой.

Для этих же целей используют и технологические приемы. При выполнении наплавочных работ следует избегать наплавки излишнего металла. При малой толщине наплавки внутренние напряжения и деформации будут меньше.

**Изменение химического состава** вызвано тем, что при сварке расплавленный металл подвергается воздействию окружающего воздуха и окисляется, насыщается азотом и водородом, происходит выгорание легирующих элементов. Образующиеся окислы металла и азотнокислые соединения (нитриды) ухудшают качество наплавленного металла и затрудняют последующую его механическую обработку. Поэтому необходима надежная защита сварочной ванны от влияния окружающего воздуха и легирование ее необходимыми элементами. Для защиты расплавленного металла от воздействия воздуха и удаления образовавшихся окислов применяют флюсы. Флюсы разрушают окислы и образуют шлаки, которые, всплывая, создают шлаковую защиту. При газовой сварке и наплавке флюсы применяют в виде порошка или пасты, при ручной электродуговой сварке – в виде покрытий электродов. Для защиты расплавленного металла также применяют нейтральные газы.

Технологические процессы восстановления деталей сваркой и наплавкой включают в себя подготовку поверхностей деталей к сварке или наплавке, выполнение сварочных или наплавочных работ, обработку поверхностей деталей после сварки или наплавки.

## **10.2. Подготовка материалов и заготовок к наплавке**

Перед наплавкой очищают и прокаливают наплавочные материалы для удаления влаги, обрабатывают поверхности деталей и электродов и при необходимости предварительно нагревают их. Применяются растворы ТМС, органические растворители (ацетон), дисковые и ленточные инструменты из абразивных материалов и дробеструйная обработка.

Предварительный нагрев изделия непосредственно перед наплавкой предотвращает растрескивание наплавленного слоя. Нагрев ведут в печах, газовыми горелками или ТВЧ.

При недостаточной температуре подогрева могут возникнуть трещины, а чрезмерный нагрев снижает скорость охлаждения и увеличивает глубину проплавления основного металла, что не обеспечивает требуемой твердости наплавленного металла. Правильный выбор температуры предварительного нагрева особенно важен при наплавке твердых материалов.

## **10.3. Способы восстановления деталей методами сварки и наплавки**

Классификация электродуговой наплавки:

- уровню механизации (ручная, полуавтоматическая, автоматическая);
- виду применяемого тока (постоянный, переменный, импульсный, специальной характеристики);
- виду электрода (плавящийся, не плавящийся);
- полярности электрода при постоянном токе (прямая, обратная);
- виду дуги (прямая, косвенная);
- режиму (стационарный, нестационарный);
- способу защиты зоны наплавки от атмосферы (в среде защитных газов, водяных паров, жидкости, под слоем флюса, комбинированный);
- способу легирования наплавленного металла (покрытием электрода,

флюсом, электродным материалом, комбинированный).

**Ручная электродуговая наплавка** выполняется в основном электродами с толстым покрытием и в тех случаях, когда применение механизированных способов невозможно или нецелесообразно, т. е. в единичном производстве, в различных пространственных положениях и в местах, труднодоступных для механизированных способов сварки.

Для получения минимальной глубины проплавления основного металла электрод наклоняют в сторону, обратную направлению наплавки. Наплавку выполняют электродами диаметром 2...6 мм на постоянном токе 80...300 А и обратной полярности с производительностью 0,8..3,0 кг/ч.

К электроду и свариваемому изделию для образования и поддержания сварочной дуги от источников сварочного тока подводится постоянный или переменный сварочный ток (рис. 33).

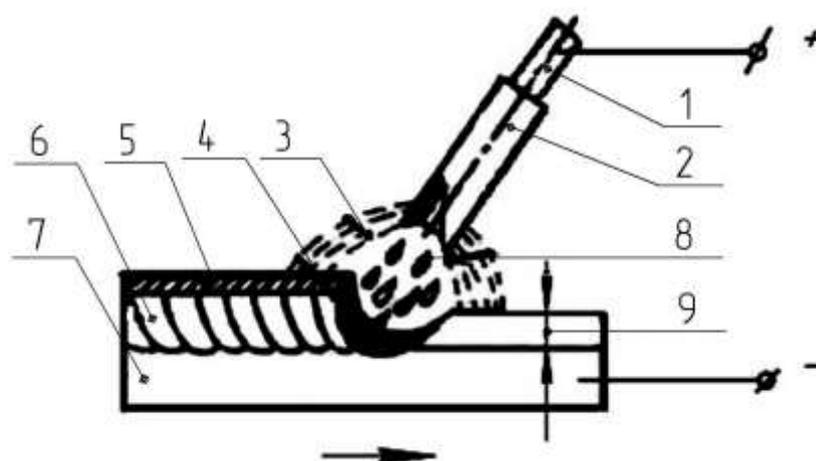


Рис. 33. Ручная дуговая сварка металлическим электродом с покрытием (стрелкой указано направление сварки): 1 – металлический стержень; 2 – покрытие электрода; 3 – газовая атмосфера дуги; 4 – сварочная ванна; 5 – затвердевший шлак; 6 – закристаллизовавшийся металл шва; 7 – основной металл; 8 – капли расплавленного электродного металла; 9 – глубина проплавления

Если сварка ведется постоянным током с «минусом» на детали, это считается сваркой с обратной полярностью, в противном случае – с прямой.

Дуга расплавляет металлический стержень электрода, его покрытие и основной металл. Расплавляющийся металлический стержень электрода в виде отдельных капель, покрытых шлаком, переходит в сварочную ванну. В сварочной ванне электродный металл смешивается с расплавленным металлом изделия (основным металлом), а расплавленный шлак всплывает на поверхность.

**Глубина проплавления** – на которую расплавляется основной металл.

**Недостатки:**

- ввиду того, что от токоподвода в электрододержателе сварочный ток протекает по металлическому стержню электрода, стержень разогревается. Этот разогрев тем больше, чем дольше протекание по стержню сварочного тока. Это приводит к тому, что скорость расплавления электрода (количество

расплавленного электродного металла) в начале и конце сварки различна. Изменяется и глубина проплавления основного металла ввиду изменения условий теплопередачи от дуги к основному металлу через прослойку жидкого металла в сварочной ванне. В результате изменяется соотношение долей электродного и основного металлов, участвующих в образовании покрытия

- малая производительность процесса, сильная зависимость качества сварного шва от квалификации сварщика и большая глубина термического влияния, что может привести к повреждению восстанавливаемой детали.

**Электродуговая наплавка под слоем флюса** – сварочная дуга горит между непокрытым электродом и изделием под слоем толщиной 10...40 мм сухого гранулированного флюса с размерами зерен 0,5...3,5 мм.

В зону наплавки подают электродную сплошную или порошковую проволоку (ленту) и флюс (рис. 34). Применяют постоянный ток обратной полярности. При наплавке цилиндрических поверхностей электрод смещают с зенита в сторону, противоположную вращению. Величина смещения составляет 10 % диаметра наплавляемой детали. Электрод должен составлять угол с нормалью к поверхности  $6...8^\circ$ . Флюс в зону наплавки подают из бункера. Расход флюса и, соответственно, толщину его слоя на поверхности детали регулируют открытием шибера. После зажигания дуги одновременно плавятся электродная проволока, поверхность детали и флюс. Сварочная дуга с каплями металла оказывается в объеме газов и паров, ограниченном жидким пузырем из расплавленного флюса. Этот пузырь обволакивает зону наплавки и изолирует ее от кислорода и азота воздуха.

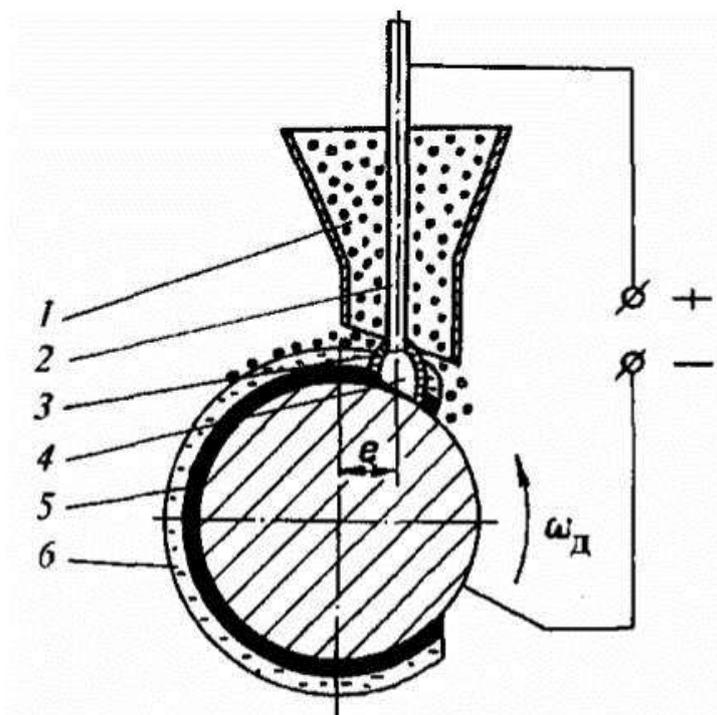


Рис. 34. Схема наплавки под слоем флюса: 1 – бункер с флюсом; 2 – электрод; 3 – оболочка расплавленного флюса; 4 – газопаровой пузырь; 5 – наплавленный слой; 6 – шлаковая корка;  $e$  – величина смещения электрода с зенита;  $\omega_D$  – угловая частота вращения детали

Для обеспечения наиболее гладкой поверхности наплавленного металла наплавка цилиндрических поверхностей проводится так, чтобы каждый последующий валик на треть перекрывал предыдущий.

Жидкий металл в сварочной ванне постоянно движется и перемешивается. Металл сварочного шва, полученного под флюсом, состоит из расплавленного присадочного (1/3) и переплавленного основного металла (2/3). Массы расплавленных флюса и присадочного металла примерно одинаковы.

Флюс является вспомогательным материалом. Флюсы применяют как в виде сухих зерен, так и в виде пасты из зерен со связующим. Элементы флюса выполняют свои функции после расплавления, сгорания или разложения. Расплавленный флюс должен быть жидкотекучим. Температура плавления присадочного материала должна превышать на 100...150 °С температуру плавления флюса. Однако флюс не должен кипеть при рабочей температуре наплавки.

Функции флюса:

- устойчивое горение дуги;
- защиту расплавленного металла от воздействия кислорода и азота воздуха;
- очистку расплавленного металла от включений и его раскисление;
- легирование необходимыми элементами материала покрытия;
- образование в дальнейшем теплоизоляционного слоя из флюса и его корки, что замедляет процесс затвердевания металла.

Наплавка под слоем флюса имеет следующие разновидности:

**Наплавка лежачим электродом** (прутковым или пластинчатым) из низкоуглеродистой или легированной стали применяется для восстановления плоскостей. Часть флюса насыпают на восстанавливаемую поверхность (толщиной 3...5 мм), а часть – на электрод (толщина слоя флюса достигает 10...15 мм). В одном месте электрод замыкают с деталью для возбуждения дуги, которая при горении блуждает в поперечном направлении. Плотность тока составляет 6...9 А/мм<sup>2</sup> напряжение 35...45 В.

Повышение производительности и более высокое содержание легирующих элементов в покрытии обеспечиваются **многоэлектродной наплавкой** под флюсом на детали со значительным износом на большой площади (рис. 35). Блуждающая дуга горит между деталью и ближайшим к ней электродом.

**Механизированная и автоматизированная наплавка под слоем флюса** применяется для деталей (диаметром более 50 мм) из углеродистых и низколегированных сталей, требующих нанесения слоя толщиной > 2 мм с высокими требованиями к его физико-механическим свойствам. Наплавливают шейки валов, поверхности катков и роликов, направляющие станин и другие элементы.

**Преимущества:**

- повышение производительности труда в 6...8 раз по сравнению с ручной электродуговой наплавкой с одновременным снижением расхода электроэнергии в 2 раза за счет более высокого термического КПД;
- высокое качество наплавленного металла благодаря насыщению необходимыми легирующими элементами и рациональной организации тепловых процессов;

- возможностью получения покрытий толщиной более 2 мм;
- меньший расход присадочного материала в результате исключения потерь на разбрызгивание, отсутствием «огарков» и уменьшением угара металла;
- лучше условия труда наплавщиков за счет механизации процесса и отсутствия открытой дуги.

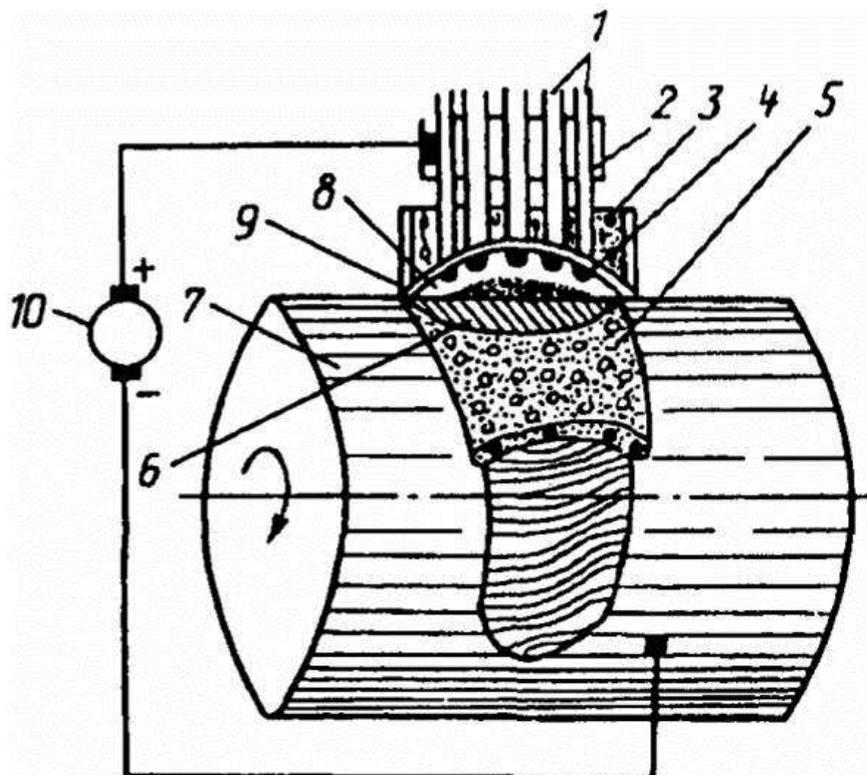


Рис. 35. Многоэлектродная наплавка под слоем флюса: 1 – электроды; 2 – токоподводящий контакт; 3 – флюс; 4 – электрическая дуга; 5 – шлаковая корка; 6 – наплавленный металл; 7 – восстанавливаемая деталь; 8 – газопаровой пузырь; 9 – оболочка расплавленного флюса; 10 – источник питания

#### **Недостатки:**

- большое вложение тепла в материал детали, что увеличивает зону термического влияния и изменяет результаты предыдущей термической обработки. Обычно требуется последующая термическая обработка;
- трудности удержания ванны расплавленного металла на поверхности цилиндрической детали и необходимость удаления шлаковой корки. По первой причине детали диаметром меньше 50 мм под слоем флюса не наплавляют;
- уменьшение усталостной прочности деталей до 20...40 % за счет остаточных напряжений, пористости и структурной неоднородности;
- появление при загрузке флюса в бункер и его просеивании после использования силикатной пыли, вредной для организма.

**Электрошлаковая наплавка (ЭШН)** характеризуется тем, что на нагретой поверхности детали образуется ванна расплавленного флюса, в которую введен электрод, а к детали и электроду приложено напряжение (рис. 36). Ток, проходящий от электрода через жидкий шлак к детали, выделяет тепло, до-

статочное для плавления шлака и электродного металла.

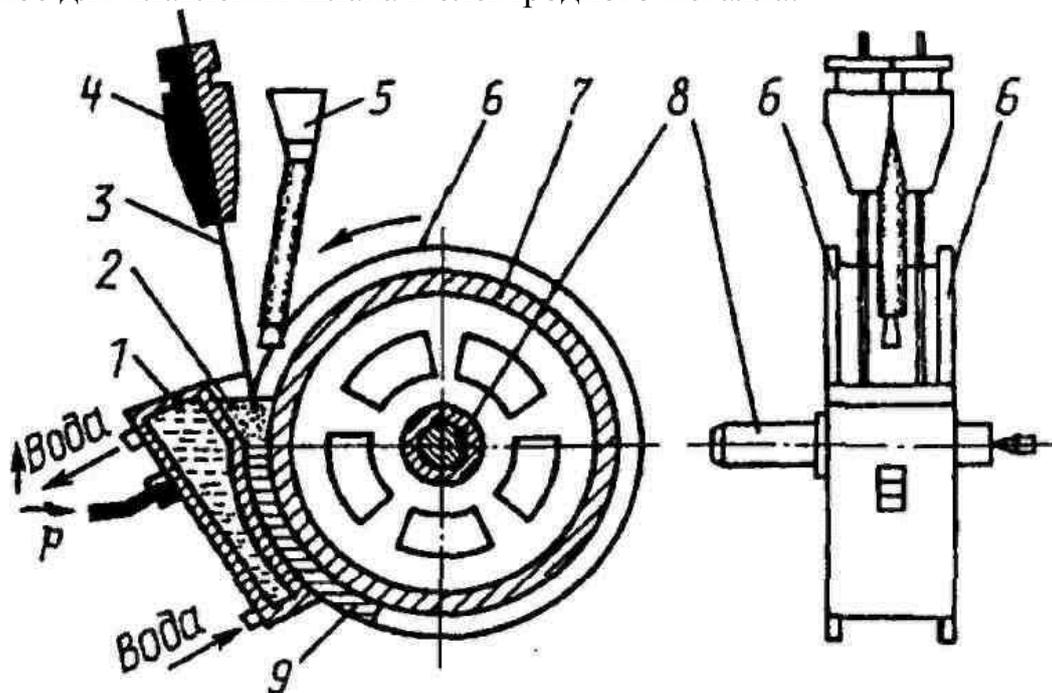


Рис. 36. Схема электрошлаковой наплавки: 1 – кристаллизатор; 2 – шлаковая ванна; 3 – электрод; 4 – мундштук; 5 – дозатор легирующих обавок; 6 – крупногабаритные диски; 7 – восстанавливаемая деталь; 8 – оправка; 9 – покрытие

Возможная толщина слоя наплавки больше 12...14 мм. Виды ЭШН:

- электродными проволоками, лентами или порошковым присадочным материалом;
- одно- или многоэлектродную;
- с плавящимся или неплавящимся электродом.

ЭШН применяют для получения биметаллических изделий и восстановления изношенных поверхностей крупных деталей с износом больше 10 мм. Таким образом, восстанавливают опорные катки гусеничных машин, звенья гусениц, работающие в абразивной среде, инструмент, шестерни коробок передач и другие детали. ЭШН целесообразно применять при больших партиях деталей и значительных объемах наплавочных работ.

ЭШН дает наибольшую производительность (до 150 кг/ч) из всех способов наплавки. Количество электродного металла, расплавленного одним и тем же количеством энергии в 2...4 раза больше, чем при ручной сварке, и в 1,5 раза выше, чем при наплавке под флюсом. Наблюдаются небольшой расход флюса, незначительный угар легирующих элементов и высокая стойкость к образованию трещин. Хорошо удаляются вредные вещества. Из-за отсутствия дугового разряда практически исключено разбрызгивание шлака и присадочного материала.

Недостатки процесса: невозможность получения покрытий толщиной меньше 10 мм; высокое содержание основного металла в покрытии.

**Наплавка в среде защитного газа** – в зону электрической дуги подают под давлением защитный газ, в результате чего столб дуги, а также сварочная

ванна изолируются от кислорода и азота воздуха (рис. 37).

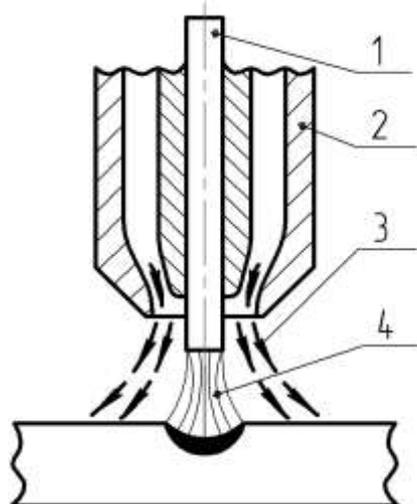


Рис. 37. Схема процесса сварки в защитной среде защитного газа:  
1 – сварочная проволока; 2 – горелка; 3 – струя защитного газа; 4 – дуга

Этим способом можно соединять вручную, полуавтоматически или автоматически в различных пространственных положениях разнообразные металлы и сплавы толщиной от десятых долей до десятков миллиметров.

Для создания защитной атмосферы используют: инертные газы (аргон, гелий и их смеси), активные газы (диоксид углерода, азот, водород, водяной пар и их смеси) и смеси инертных и активных газов. Наилучшую защиту обеспечивают инертные газы, однако их применение ограничивается высокой стоимостью. Чаще применяют водяной пар, пищевую углекислоту и сварочный диоксид углерода.

Углекислый газ надежно изолирует зону наплавки и обеспечивает получение наплавленного металла высокого качества с минимальным количеством пор. Однако в зоне наплавки углекислый газ под влиянием высокой температуры разлагается на кислород и окись углерода.

Сквозняки или ветер при сварке, сдувая струю защитного газа, могут резко ухудшить качество сварного шва.

Наибольшее применение в ремонте получила наплавка в среде диоксида углерода плавящимся электродом. Используют электродные проволоки диаметром 0,8...2,0 мм и токи относительно большой плотности. Давление газа 0,05...0,20 МПа, его расход 0,60...0,96 м<sup>3</sup>/ч.

Автоматическая наплавка в среде диоксида углерода *по сравнению с автоматической наплавкой под флюсом* обеспечивает формирование плотного шва с небольшой зоной термического влияния, что позволяет осуществлять наплавку нежестких деталей малого диаметра.

#### **Преимущества:**

- меньший нагрев детали;
- возможность наплавки деталей меньшего диаметра;
- более высокая производительность (в 1,2...1,5 раза по массе и 30...40 % по площади покрытий);
- исключение необходимости отделения шлаковой корки и зачистки

ШВОВ;

- возможность сварки и наплавки в любых пространственных положениях;

- в 1,2... 1,5 раза лучшей экономичностью.

- меньшая стоимость углекислого газа по сравнению с флюсом.

#### **Недостатки:**

- необходимость применения легированной проволоки для получения наплавленного металла с требуемыми свойствами;

- необходимость защиты сварщика от излучаемой дуги.

**Наплавка открытой дугой самозащитными материалами** – в состав сердечников электродных материалов кроме порошков легирующих компонентов вводят газо- и шлакообразующие вещества, которые защищают жидкий металл от воздействия атмосферы и повышают стабильность процесса наплавки, что позволяет отказаться от флюса и защитных газов.

Недостатки: повышенное световое излучение дуги, газовыделение и разбрызгивание, что приводит к снижению использования тепла при наплавке и массы наплаваемого материала.

**Вибродуговая наплавка** – наплавка поверхности детали вибрирующей электродной проволокой в струе охлаждающей жидкости или защитного газа. (рис. 38). Отличается тремя особенностями:

- в цепь нагрузки источника питания включена индуктивность  $L$ ;

- напряжение источника питания недостаточно для поддержания непрерывного дугового разряда;

- электродная проволока совершает колебания относительно детали с частотой 50...100 Гц и амплитудой 1...3 мм с периодическим касанием наплаваемой поверхности.

Цикл наплавки состоит из дугового разряда, короткого замыкания и холостого хода.

Введение индуктивности в цепь дуги обеспечивает накопление электрической энергии в индуктивности во время разомкнутого состояния цепи, сдвиг фаз тока и напряжения, что обеспечивает повторное возникновение дугового разряда после разрыва сварочной цепи и устойчивое горение дуги.

Электрод и деталь оплавляются во время дугового разряда, при этом на конце электрода образуется капля металла. Мелкокапельный перенос металла на деталь происходит преимущественно во время короткого замыкания. Так как длительность существования дуги составляет ~20 % времени цикла, то провар основного металла неглубокий, с небольшой зоной термического влияния.

Вибродуговую наплавку ведут под флюсом, в различных газовых средах или в водных растворах.

Примерные режимы наплавки: ток обратной полярности силой 70...75 А, напряжением 12...30 В, диаметр проволоки 1,6 мм, шаг наплавки 2,3...2,7 мм/об (мм/дв. ход), угол подвода проволоки к детали 15...30°, скорость подачи проволоки < 1,65 м/мин, скорость наплавки 0,50...0,65 м/мин.

Вибродуговую наплавку применяют для восстановления изношенных наружных и внутренних цилиндрических поверхностей стальных и чугунных

деталей, а также резьбовых и шлицевых поверхностей.

**Достоинства:**

- восстановления деталей диаметром 10...15 мм;
- небольшой нагрев детали, малая зона термического влияния;
- возможность получения наплавленного металла требуемой твердости и износостойкости без термической обработки.

**Недостатки:**

-охлаждение наплавляемой поверхности с высокой скоростью дает неодинаковую твердость участков поверхности и микротрещины, поэтому применяется при восстановлении деталей с невысокими требованиями к сопротивлению усталости;

- наличие пор в покрытии по причине быстрого перехода металла из жидкого состояния в твердое.

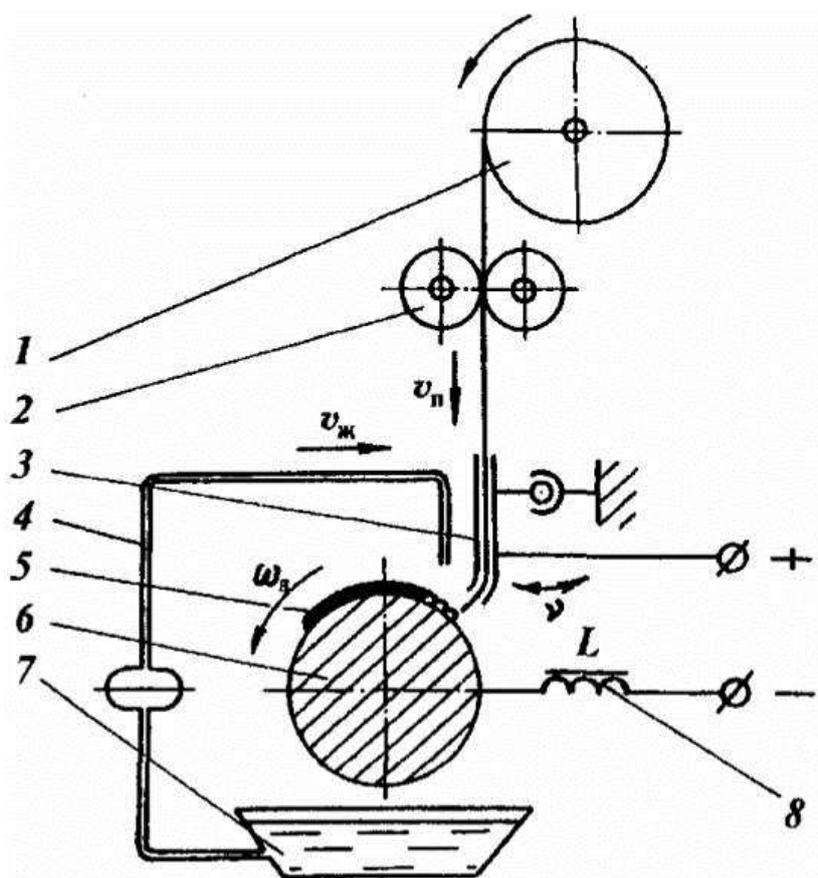


Рис. 38. Схема вибродуговой наплавки:

- 1 – кассета для проволоки; 2 – подающие ролики; 3 – качающийся мундштук; 4 – система подачи раствора; 5 – наплавленный слой; 6 – восстанавливаемая деталь; 7 – емкость; 8 – индуктивное сопротивление;  $v_п$  и  $v_ж$  – скорость подачи соответственно проволоки и раствора;  $\omega_д$  – угловая частота вращения детали;  $\nu$  – частота качаний мундштука;  $L$  – индуктивность

**Импульсно-дуговая наплавка** – разновидность электродуговой наплавки. В этом случае на основной сварочный ток непрерывно горящей дуги с помощью специального генератора налагают кратковременные импульсы тока,

которые ускоряют перенос капель металла и уменьшают их размер.

Наплавляют наружные цилиндрические поверхности с износом до 0,5 мм и с ограничениями по температуре нагрева детали.

**Электромагнитная наплавка** – нанесение покрытия из порошка на поверхность заготовки в магнитном поле при пропускании постоянного тока большой силы через зоны контакта частиц порошка между собой и с заготовкой.

Магнитное поле создают в зазоре между заготовкой и полюсным наконечником. Оно выстраивает мостики частиц ферромагнитного порошка между указанными элементами. На магнитное поле, в свою очередь, налагают электрическое поле путем приложения напряжения к заготовке и полюсному наконечнику. Восстановительное покрытие получается за счет нагрева частиц порошка в зазоре, их оплавления и закрепления на восстанавливаемой поверхности.

Способ позволяет совмещать во времени процессы нанесения покрытия и ППД. Электромагнитную наплавку можно совмещать со шлифованием абразивными частицами наносимого материала.

Область применения – восстановление деталей с износом до 0,6 мм в мелко- и среднесерийном производствах с одновременным их поверхностным пластическим деформированием.

**Наплавка намораживанием** – последовательное затвердевание сплава на очищенной от оксидной пленки поверхности заготовки, погруженной в расплав. Заготовку после кратковременной выдержки извлекают из расплава с образовавшимся на ее поверхности слоем наплавленного металла.

Применяется для повышения долговечности деталей, работающих в абразивной среде. Получают детали с биметаллической рабочей частью. В этом случае основной металл обеспечивает прочность, а наплавленный твердый сплав – абразивную износостойкость.

Основные операции – подготовка присадочного материала и восстанавливаемой поверхности, погружение заготовки в расплав, выдержка, извлечение из расплава и охлаждение.

Невосстанавливаемые поверхности заготовки, соприкасающиеся с расплавом, защищают нанесением на них тонкого слоя меловой обмазки. На восстанавливаемые поверхности последовательно наносят слои водного раствора жидкого стекла и порошкообразного флюса. Заготовку помещают в высокочастотный индуктор для активации наплавляемой поверхности при температуре 850...900 °С. Процесс активации протекает в течение 10...12 с, при этом флюс плавится, очищает поверхность от оксидов и защищает ее от последующего окисления.

Нагретую заготовку погружают в расплав. Детали типа ковшовых зубьев выдерживают в расплаве в течение 0,8...1,2 с. За это время на поверхности заготовки затвердевает слой сплава толщиной 2,5...3,0 мм. Затем деталь охлаждают на воздухе.

**Электроконтактная приварка** – закрепление металлического слоя на изношенной поверхности мощными импульсами тока с приложением давления

(рис. 39).

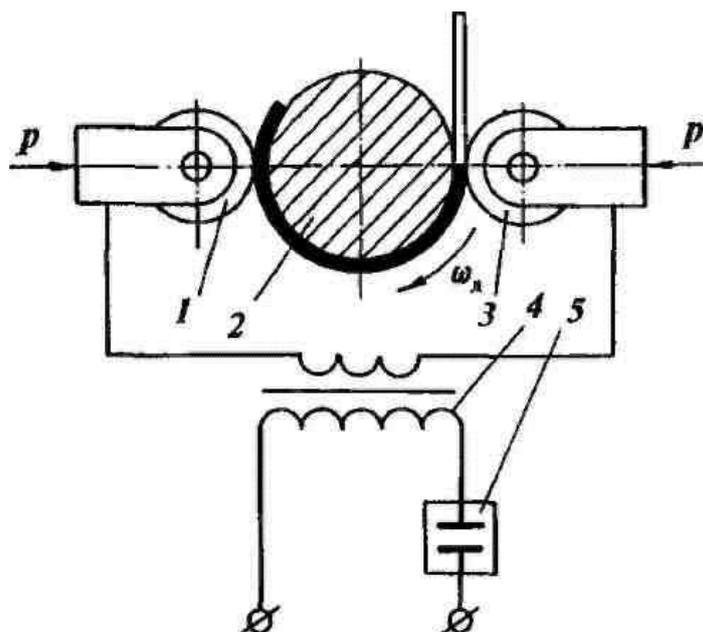


Рис. 39. Схема электроконтактной приварки ленты: 1 и 3 – ролики; 2 – восстанавливаемая деталь; 4 – трансформатор; 5 – контактор

Металл детали и слоя расплавляется в результате прохождения тока не по всей толщине покрытия, а только в точках контакта материала. Способ реализуют путем совместного деформирования наносимого металла и поверхностного слоя детали, нагретых в очагах пластического деформирования короткими (0,02...0,16 с) импульсами тока 7...30 кА.

Деформирующее усилие составляет 1000...1600 Н. Слой приваривают по всей поверхности детали перекрывающимися точками, которые располагаются по винтовой линии. Сварные точки перекрываются как вдоль рядов, так и между ними. Перекрытия точек достигают частотой импульсов тока, пропорциональной частоте вращения детали и скорости продольного перемещения сварочной головки. Материал детали прогревается на малую глубину, что обеспечивает неизменность его хим. состава и исключает применение флюсов и защитных газов. Для уменьшения нагрева детали и улучшения условий закалки приваренного слоя в зону приварки подают охлаждающую жидкость.

**Электроконтактная приварка порошковых материалов** заключается в том, что между движущимися деталью и электродом помещают металлический порошок, через них пропускают электрический ток с приложением давления. Разновидности представлены на рис. 40.

Вращающаяся или неподвижная деталь является одним из электродов переменного тока, второй медный электрод вращается или неподвижен. В зазор между электродами из бункера подают порошковый материал. Материал к восстанавливаемой поверхности детали прижимают под давлением 30...60 МПа вторым электродом. Через электроды и материал пропускают электрический ток силой 5...30 кА, плотностью 1...5 А/см<sup>2</sup>, напряжением 6...12 В и импульсами длительностью 0,04...0,14 с. Скорость приварки составляет 0,17...0,37 м/мин.

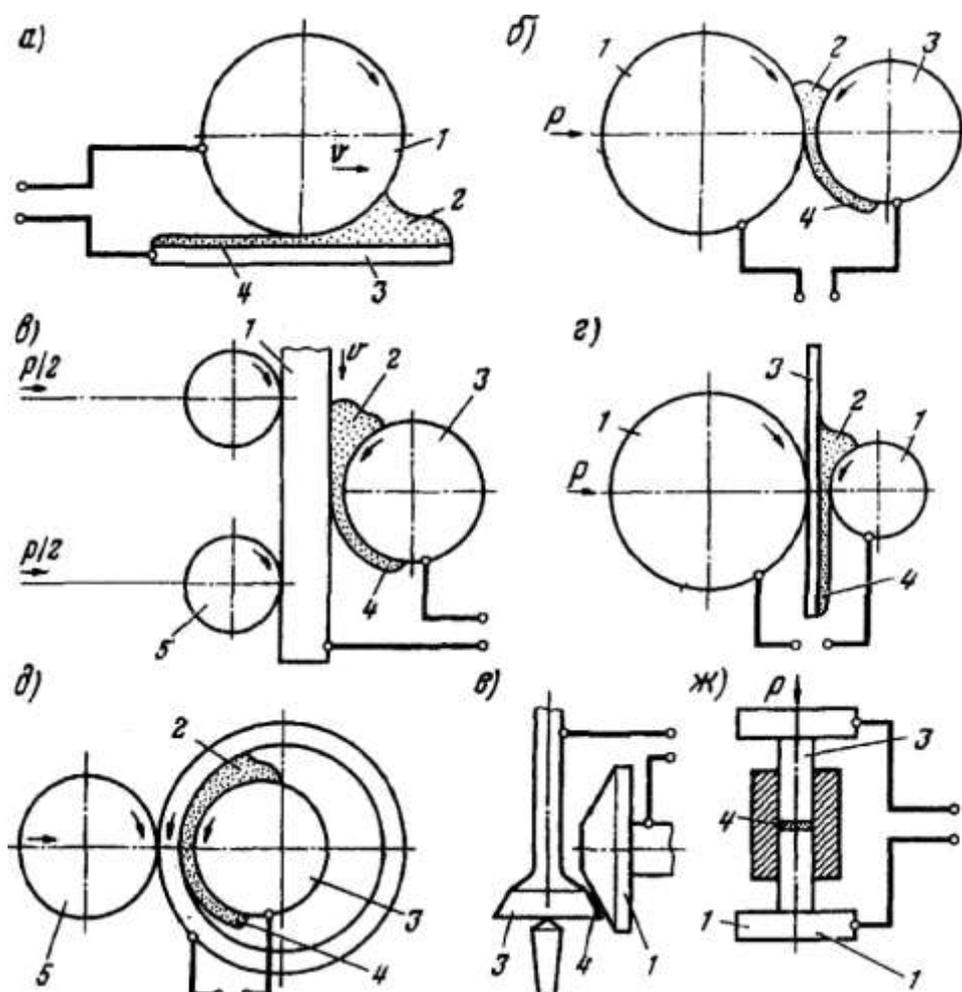


Рис. 40. Схема электроконтактной приварки порошков на поверхности: а – плоскую (горизонтальная схема); б – наружную цилиндрическую; в – наружную цилиндрическую плоским электродом; г – плоскую (вертикальная схема); д – наружную цилиндрическую; е – коническую; ж – торцовую; 1 – электрод; 2 – порошок; 3 – деталь; 4 – слой порошка; 5 – нажимной ролик

**Стыковая сварка** – соединяемые детали свариваются встык по всей плоскости их касания (рис. 41, а). Для этого свариваемые детали устанавливают в зажимах машины, прижимают небольшим усилием  $P$  одну к другой и пропускают по ним электрический ток. В результате большого сопротивления, которое встречает проходящий через детали ток, происходит нагрев и оплавление деталей в местах их стыка. От оплавления к осадке переходят мгновенно. Осадка начинается при включенном токе и заканчивается при выключенном. Плотность тока составляет  $10...50 \text{ А/мм}^2$ .

**Точечная сварка** применяется для соединения деталей из тонколистового материала. Заготовки устанавливают и плотно прижимают между торцами медных электродов контактной машины (рис. 41, б). Затем через электроды и детали пропускают электрический ток большой силы. В месте контакта деталей из-за повышенного электрического сопротивления выделяется теплота, под действием которой центральная часть деталей нагревается до расплавления, образуя расплавленное ядро металла. Ток выключается, и давлением электродов заготовки выдерживают до кристаллизации расплавленного металла в ядре

сварной точки, обеспечивая прочное их соединение. Плотность тока  $120 \dots 3600 \text{ А/мм}^2$ , время сварки  $0,2 \dots 1,5 \text{ с}$ .

**Шовная сварка** – также предназначена для соединения деталей из тонколистового материала. Заготовки устанавливают между вращающимися токоподводящими дисковыми электродами, на которые действует усилие механизма сжатия, в результате чего получают сплошной сварной шов (рис. 41, в). Шовную сварку применяют при необходимости получения сплошного шва, обеспечивающего плотность и герметичность соединения.

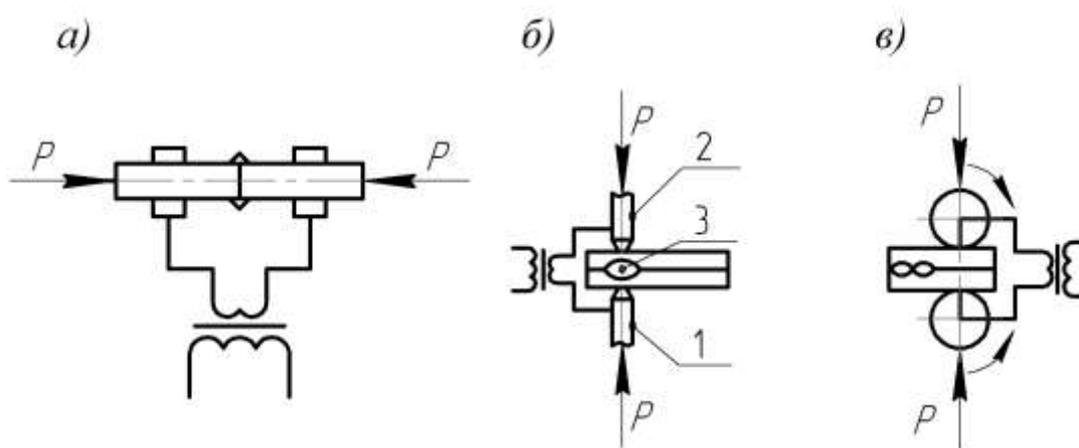


Рис. 41. Схемы контактной сварки: а – стыковой; б – точечной; в – шовной; 1 и 2 – электроды; 3 – сварная точка

**Плазменная наплавка** – процесс нанесения покрытий плазменной струей, с помощью которой нагреваются поверхность восстанавливаемой детали и наносимый материал. Материал перемещается плазменной струей.

Плазма – ионизированный газ, содержащий электрически заряженные частицы и способный проводить ток. Ионизация газа происходит при его нагреве. Степень ионизации тем выше, чем выше температура газа. В центральной части сварочной дуги газ нагрет до температур  $5\ 000 \dots 30\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ , имеет высокую электропроводность и ярко светится.

Плазменную струю, используемую для сварки и резки, получают в специальных плазмотронах, в которых нагревание газа и его ионизация осуществляются дуговым разрядом в специальных камерах.

Вдуваемый в камеру газ (рис. 42), сжимая столб дуги в канале сопла плазмотрона и охлаждая его поверхностные слои, повышает температуру столба. В результате струя проходящего газа, нагреваясь до высоких температур, ионизируется и приобретает свойства плазмы. Увеличение при нагреве объема газа в  $50 \dots 100$  и более раз приводит к истечению плазмы с высокими околозвуковыми скоростями. Плазменная струя легко расплавляет любой металл.

Используется для нагрева, сварки, наплавки или резки как электропроводных металлов, так и неэлектропроводных материалов, таких как стекло, керамика и др.

Плазменную струю получают по двум основным схемам:

- при плазменной струе прямого действия изделие включено в сварочную

цепь дуги, активные пятна которой располагаются на электроде и изделии;  
 - при плазменной струе косвенного действия активные пятна дуги находятся на электроде и внутренней или боковой поверхности сопла.

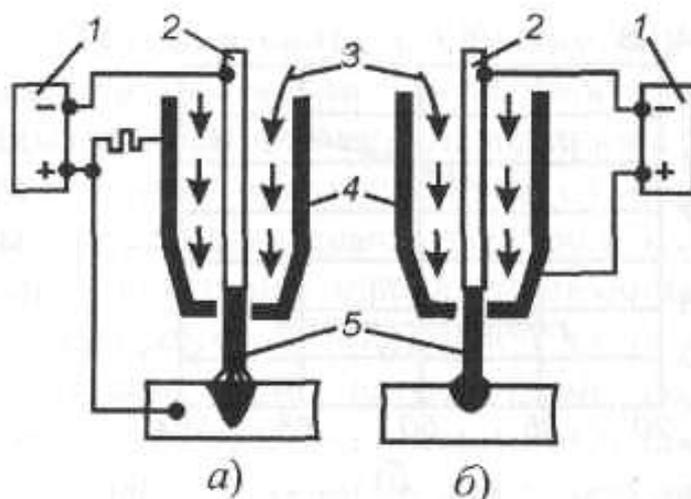


Рис. 42. Схемы получения дуговой плазменной струи:  
 а – прямого действия; б – косвенного действия; 1 – источник тока;  
 2 – электрод; 3 – газ; 4 – сопло; 5 – плазменная струя

Для плазменной наплавки плазменную струю получают в специальных плазменных горелках-плазмотронах. Плазмотрон (рис. 43) состоит из медного сопла и электрода, изготовленного из вольфрама диаметром 3...6 мм, изолированных друг от друга изоляционной прокладкой и через отдельные водяные рубашки охлаждаемых водой.

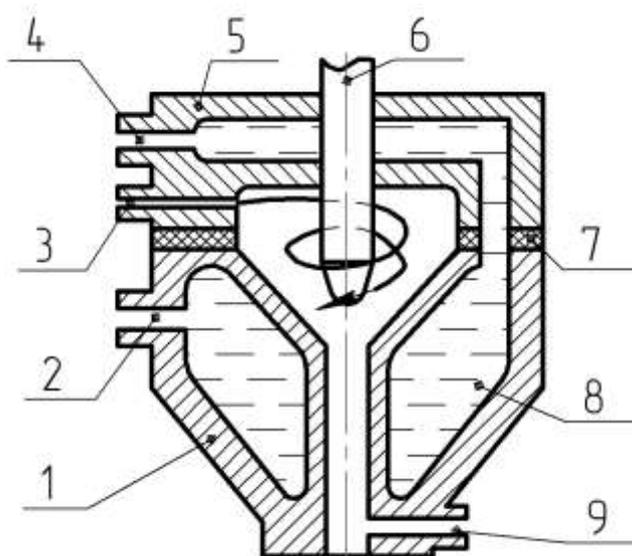


Рис. 43. Схема плазмотрона: 1 – сопло-анод; 2 и 4 – отверстия соответственно для входа и выхода воды; 3 – отверстие для входа плазмообразующего газа; 5 – корпус; 6 – катод; 7 – изолирующая прокладка; 8 – рубашка охлаждения; 9 – отверстие для присадочного материала (порошка)

В качестве плазмообразующего газа применяются воздух, аргон, гелий, азот, водород и их смеси. Сила тока в дежурной дуге 15...25 А, в основной дуге 150...200 А, рабочее напряжение 40...45 В. Расход плазмообразующего газа аргона составляет 1,5...2,5 л/мин. Расстояние от сопла до присадочной проволоки 5...8 мм, до детали 10...18 мм.

Плотность энергии высока и скорость ввода тепла в деталь больше скорости теплопередачи в ее массу, поэтому поверхность детали быстро расплавляется.

**Преимущества:**

- высокая производительность процесса.
- гладкая и ровная поверхность покрытий позволяет оставлять припуск на обработку 0,4...0,9 мм;
- малая глубина проплавления (0,3...3,5 мм) и небольшая зона термического влияния (3...6 мм) обуславливают долю основного металла в покрытии < 5 % и большой термический КПД.
- малое вложение тепла в обрабатываемую деталь обеспечивает небольшие деформации и термические воздействия на структуру основы.
- обеспечивается высокая износостойкость, наблюдается снижение усталостной прочности деталей на 10...15%, что намного меньше по сравнению с другими видами.

**Недостатки:**

- применение дорогих инертных газов;
- высокие затраты на нагрев.

Применяется для ответственных деталей: коленчатые, кулачковые и распределительные валы, валы турбокомпрессоров, оси, крестовины карданных шарниров, направляющие оборудования и др., работающих при больших нагрузках, высокой температуре и в агрессивной среде.

Область применения способа – нанесение тонкослойных покрытий на нагруженные детали с малым износом.

**Лазерная наплавка** – источник тепла – концентрированный луч лазера.

Позволяет выполнять: наплавку, оплавление напыленных поверхностей, поверхностное легирование, поверхностную закалку, соединять детали в труднодоступных местах и керамические изделия.

Применяется при восстановлении ответственных деталей с местным износом. Наиболее эффективен при восстановлении поверхностей площадью 5...50 мм и величиной износа 0,1...1,0 мм, при этом расход порошков невелик, глубина термического влияния обычно не превышает 0,5...0,6 мм, а деформации детали отсутствуют.

Твердость покрытий из самофлюсующихся порошков, которые наносят на поверхность детали как пасту, составляет 35...60 HRC. Толщина нанесенного слоя достигает 40...50 мкм. Прочность соединения покрытия с материалом подложки больше 250 МПа.

**Преимущества:**

- возможность наращивать любые, в том числе и труднодоступные изношенные участки поверхности;

- возможность регулирования количества тепловой энергии, выделяемой в зоне нагрева;
- отсутствие тепловых деформаций в зоне нагрева.

**Недостатки:**

- ограниченная мощность излучения и очень высокая стоимость установки.

**Электронно-лучевая наплавка** – нагрев материала и поверхности детали потоком электронов. Способ обеспечивают высококонцентрированное вложение энергии в нагреваемую поверхность.

Малый объем обрабатываемого металла и кратковременность теплового воздействия гарантируют незначительные термические деформации соединяемых деталей. Толщина покрытий – 0,1...1,5 мм на сторону.

Толщина насыпного слоя изменяется от 1 до 5 мм, ширина слоя 8...40 мм, мощность электронного пучка 1,5...15 кВт, скорость наплавки 8...110 мм/с.

**Индукционная наплавка** – основана на использовании токов высокой частоты для подогрева металла детали и присадочного материала.

Индукционный нагрев по удельной мощности тепловложения превосходит газовый и электродуговой. Однако при наплавке ТВЧ отсутствует защитная среда, что требует очистки деталей и введения дополнительных флюсов.

Деталь с нанесенной шихтой вводят в индуктор ТВЧ установки. Наружный слой основного металла нагревается. Шихта нагревается главным образом за счет теплопередачи от основного металла. Температура плавления шихты на 100...150 К ниже температуры плавления основного металла, а скорость нагрева поверхности детали – выше скорости теплоотвода в глубину детали. Продолжительность индукционной наплавки 55...60 с.

**Преимущества:**

- высокая производительность;
- отличное качество наплавленного слоя по химическому составу, плотности, структурной однородности и шероховатости поверхности;
- незначительное проплавление основного металла при высокой прочности соединения;
- возможность получения тонких слоев при обеспечении жесткого допуска на толщину покрытия.

**Недостатки:**

- высокая энергоемкость;
- сложность использования для восстановления деталей с неравномерным износом.

**Газовая наплавка** – используется при нанесении покрытий из цветных металлов в виде проволоки и твердых сплавов в виде порошка. Несмотря на невысокую мощность газового пламени, оно дает мягкий и локальный нагрев, позволяет наносить покрытия на малогабаритные детали с небольшим износом в труднодоступных местах.

Газовое пламя чаще всего образуется в результате сгорания (окисления) горючих газов технически чистым кислородом (чистота не ниже 98,5 %). При

горении горючих газов с использованием воздуха температура газового пламени низкая (не выше 2000 °С), так как много теплоты расходуется на нагрев азота, содержащегося в воздухе. В качестве горючих газов чаще всего используют ацетилен и пропан.

Газовое сварочное ацетилено-кислородное «нормальное» пламя имеет форму, схематически показанную на рис. 44. Во внутренней части ядра пламени 1 происходит подогрев газовой смеси, поступающей из сопла до температуры воспламенения. Зона 2 является наиболее важной частью сварочного пламени (сварочной зоной). В ней происходит первая стадия сгорания ацетилена за счет кислорода, поступающего в сопло из баллона, в результате чего здесь развивается максимальная температура. Содержащиеся в сварочной зоне газы обладают восстановительными свойствами по отношению к оксидам многих металлов, в том числе и к оксидам железа. Поэтому ее можно назвать восстановительной. Содержание углерода в металле шва изменяется незначительно.

В зоне 3 или факеле пламени протекает догорание газов за счет кислорода воздуха. Содержащиеся в факеле газы и продукты их диссоциации окисляют металлы, т. е. эта зона является окислительной.

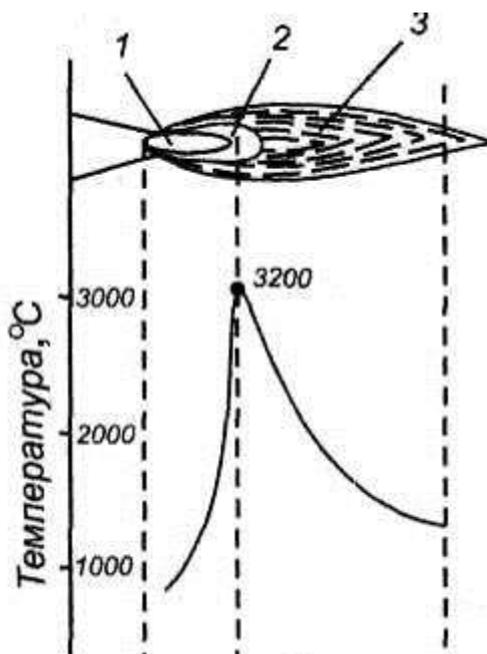


Рис. 44. Строение газового пламени

Технология **ручной газопорошковой наплавки** включает:

- равномерный нагрев восстанавливаемой поверхности нейтральным пламенем горелки до температуры 300...400 °С с расстояния 10...30 мм путем перемещения пламени по всей поверхности;
- однократное нанесение покрытия при полной подаче порошка, при этом наносимый порошок образует тонкий слой на поверхности;
- нагрев покрытия до расплавления;
- нанесение покрытия без расплавления основного материала при пульсирующей подаче порошка, чтобы обеспечить полное расплавление его ча-

стиц. Наплавку начинают с центра зоны наплавки и постепенно подходят к краям до полного выравнивания наружной поверхности. Ось сопла горелки перпендикулярна к восстанавливаемой поверхности;

- нагрев поверхности покрытия и прилегающего участка детали с расстояния 50...60 мм.

В целом метод газопламенной сварки, несмотря на то, что он уступает другим методам сварки и наплавки по ряду параметров, вследствие своей универсальности до сих пор применяется в ремонтных предприятиях.

#### 10.4. Восстановление деталей напылением материала

Напыление заключается в нагреве материала, его диспергировании (дроблении), переносе движущейся средой, ударе о восстанавливаемую поверхность или покрытие, деформировании и закреплении (рис. 45).

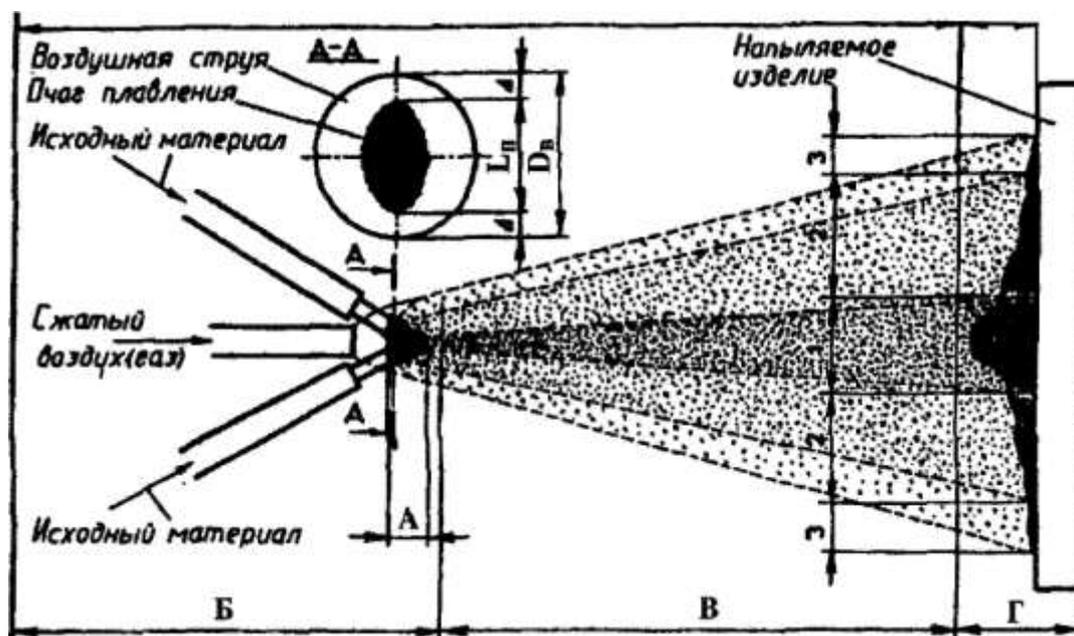


Рис. 45. Схема процесса напыления: А – зона расплавления материала; Б – зона распыления; В – факел; Г – зона образования покрытия; 1, 3 – пятно насыщения соответственно максимального и минимального; 2 – кольцо среднего насыщения;  $D_B$  – диаметр воздушной струи;  $L_{п}$  – размер очага плавления; А – перекрытие

Особенность – в отсутствии расплавления поверхности основного металла, что обеспечивает незначительную деформацию детали. Небольшая температура подложки (до 150...200 °С) позволяет применять процесс для нанесения покрытий на стекло, фаянс, фарфор, дерево, пластмассу, ткань или картон.

Соединение металлических частиц с поверхностью детали и между собой носит в основном механический характер. Пластическое деформирование частиц при ударах о подложку и между собой придает им расплюснутую форму, вызывает наклеп материала, изменение текстуры и частичное разрушение оксидной пленки. Характеристики видов напыления приведены в табл. 3.

**Техпроцесс** включает:

- предварительную обработку наносимого материала;
- предварительную механическую обработку восстанавливаемой поверхности;
- подготовку восстанавливаемой поверхности (нарезание «рваной» резьбы, дробеструйную обработку, обезжиривание);
- изоляцию поверхностей, не подлежащих напылению (установку заглушек в масляные каналы детали, выходящие в зону напыляемых поверхностей, установку экранов, нанесение лака);
- нагрев детали;
- нанесение подслоя;
- нанесение основного покрытия;
- оплавление покрытия;
- выдержку деталей в термосе;
- снятие экранов и заглушек, очистку детали.

По виду защиты рабочей зоны напыления различают процессы **без защиты, с местной защитой и в герметичной камере.**

Процесс нанесения покрытия может быть **без оплавления, с одновременным оплавлением, с последующим оплавлением.**

Таблица 3

Значения параметров различных способов напыления

Параметр	Виды напыления			
	электро- дуговое	газопла- менное	плазмен- ное	детона- ционное
Производительность процесса, кг/ч	3...50	1...10	3...12	0,1...6,0
Коэффициент использования напыляемого материала	0,80...0,95		0,70...0,90	0,30...0,60
Прочность соединения покрытия с основой, МПа	До 40	До 50	До 60	До 200
Температура частиц, °С	До 1800	До 3000		До 4000
Скорость частиц материала, м/с	50...150	20... 120	50...400	600...800

**Достоинства:** производительный и сравнительно простой процесс, обеспечивающий небольшой нагрев детали, высокую износостойкость покрытий.

**Недостатки:** невысокая адгезионная и когезионная прочность покрытий по сравнению с прочностью монолитного металла, окисление материала, повышенное выгорание легирующих элементов, потери материала.

### 10.5. Способы восстановления деталей напылением материала

**Электродуговое напыление** состоит в расплавлении материала металлических проволок электрической дугой, зажженной между ними; продувании через электрическую дугу струи сжатого газа; сдувании расплавленного металла и переносе его в виде частиц на восстанавливаемую поверхность (рис. 46).

В корпус аппарата для электродугового напыления с одинаковой скоростью подаются две изолированные друг от друга и находящиеся под напряжением проволоки. При соприкосновении проволок в распылительной головке возникает электрическая дуга, под действием которой они плавятся. Струей воздуха давлением 0,4...0,6 МПа частицы расплавленного металла наносятся на подготовленную поверхность детали. Режим электродугового напыления следующий: скорость вращения детали 15...20 м/мин; расстояние напыления 75...100 мм; сила тока 120...180 А; напряжение 25...30 В.

Электродуговое напыление применяется для восстановления изношенных поверхностей деталей цилиндрической и плоской формы из стали, чугуна и цветных металлов, работающих в условиях трения скольжения и неподвижных посадок, и для нанесения антикоррозионных покрытий.

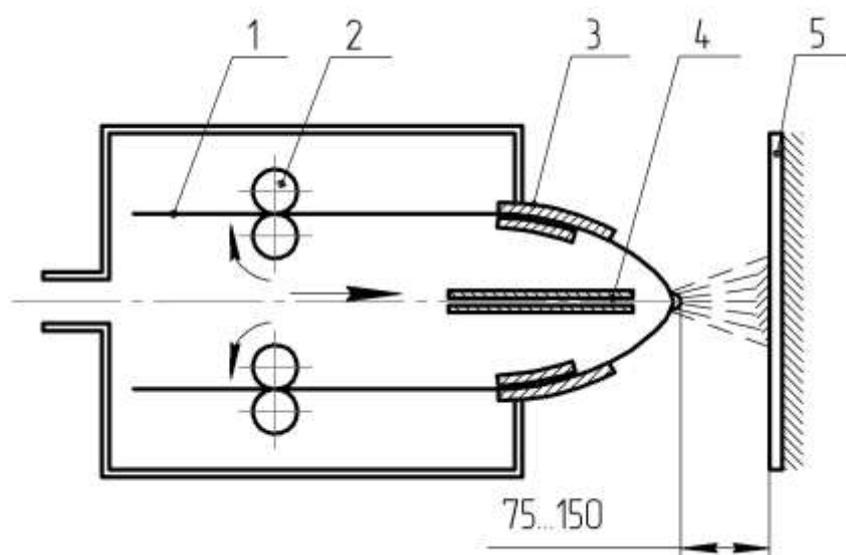


Рис. 46. Схема электродугового напыления: 1 – проволока; 2 – подающий механизм; 3 – направляющие наконечники; 4 – воздушное сопло; 5 – напыляемая поверхность

#### Достоинства:

- наибольшая производительность (до 50 кг/ч) из всех способов напыления;
- высокий термический КПД;
- возможность получения покрытий с высокой адгезионной и когезионной прочностью и низкой пористостью;
- в 2 раза меньше затраты на нанесение 1 кг покрытия, чем при электродуговой наплавке;
- простота применяемого оборудования

#### Недостатки:

- интенсивное взаимодействие частиц с газовой средой, из-за чего напыленный металл насыщен кислородом и азотом, а также содержит значительное количество оксидов;
- необходимость применения только токопроводящих напыляемых материалов;

- большое выгорание легирующих элементов.

**Газопламенное напыление** – заключается в нагреве напыляемых материалов газовым пламенем и нанесении их на восстанавливаемую поверхность струей сжатого газа.

Проволока с постоянной скоростью подается роликами. Проходя через червячный редуктор и попадая в зону пламени, проволока расплавляется. Металлические порошки поступают в горелку из бункера с помощью транспортирующего газа или под действием силы тяжести (рис. 47).

Тепло для нагрева материала получают путем сжигания ацетилена или пропан-бутана в кислороде, а переносится материал сжатым воздухом или продуктами сгорания углеводородного топлива. В качестве основного материала применяют порошки, проволоки и шнуры. *Применяют 3 вида напыления.*

- **Без оплавления** – для деталей, не испытывающих деформации, температуру более 350 °С и знакопеременные нагрузки. Используют при восстановлении наружных и внутренних цилиндрических поверхностей подвижных и неподвижных соединений при невысоких требованиях к прочности соединения с основным материалом.

- **Последующее оплавление** выполняют газокислородным пламенем, в индукторе или другим источником тепла для покрытий толщиной 0,5...1,3 мм. Используют при повышенных требованиях к износостойкости и прочности соединения с основным материалом.

- **Одновременное оплавление (газопорошковая наплавка)** используют для восстановления деталей из стали и чугуна при износе на сторону 1,3...1,8 мм.

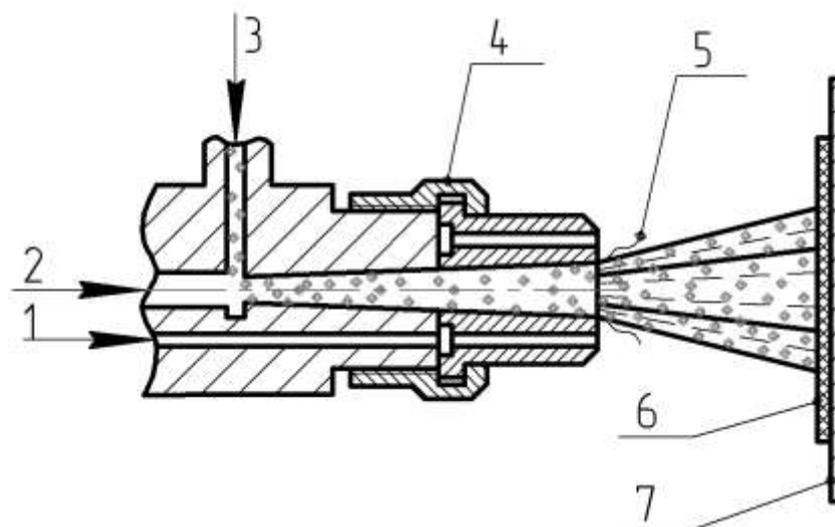


Рис. 47. Схема газопламенного напыления: 1 – кислород и горючий газ; 2 – транспортирующий газ; 3 – напыляемый порошок; 4 – сопло; 5 – факел газового пламени; 6 – напыленное покрытие; 7 – напыляемая поверхность

Газопламенное напыление применяют для восстановления посадочных мест под подшипники на валах коробки передач, опорных шеек распредели-

тельного вала, постелей коренных подшипников в блоке цилиндров и др. Достоинствами газопламенного напыления являются небольшое окисление металла, мелкое его распыление, достаточно высокая прочность покрытия. К недостаткам относится сравнительно невысокая производительность (2...4 кг/ч).

**Плазменное напыление** заключается в расплавлении и нанесении напыляемых материалов на поверхность деталей с помощью плазменной струи (рис. 48). Для напыления используется плазменная дуга косвенного действия между охлаждаемыми вольфрамовым электродом (катодом) и медным соплом (анодом). Напыляемый порошок при помощи транспортирующего газа (азота) подается из порошкового питателя в плазменную струю. Попадая в плазменную струю, порошок расплавляется и приобретает скорость 150...200 м/с и выше. Возможен ввод порошка с плазмообразующим газом.

В качестве плазмообразующих газов при напылении материалов используют аргон, гелий, азот, водород и их смеси. Они не содержат кислорода, поэтому не окисляют материал и напыляемую поверхность.

Напыляемую деталь в цепь нагрузки не включают.

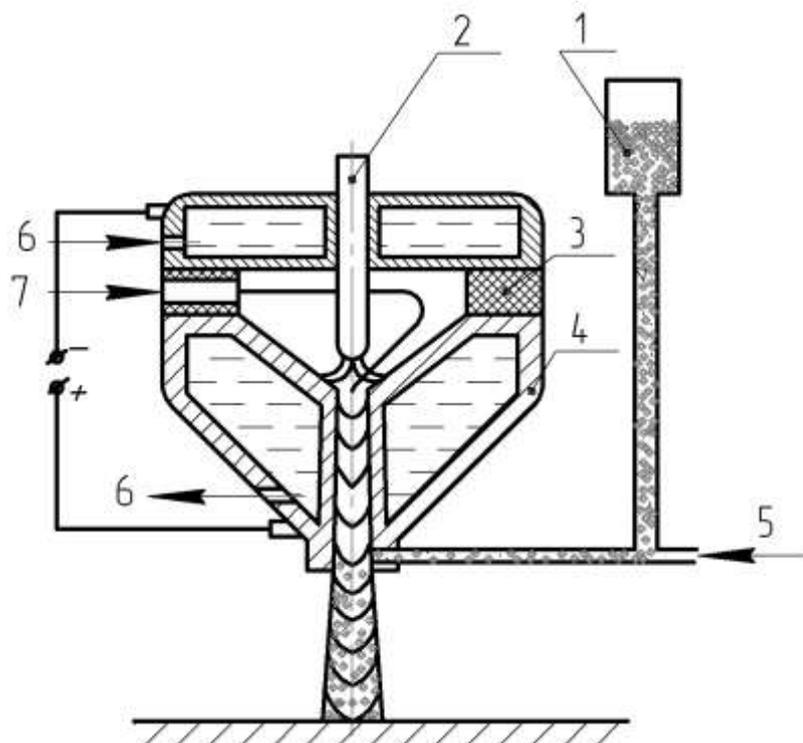


Рис. 48. Схема плазменного напыления: 1 – порошковый дозатор; 2 – катод; 3 – изоляционная прокладка; 4 – анод (сопло); 5 – транспортирующий газ; 6 – охлаждающая вода; 7 – плазмообразующий газ

Область применения – это восстановление поверхностей деталей, работающих в условиях знакопеременных и контактных нагрузок.

Достоинством плазменного напыления являются: высокая производительность (до 12 кг/ч); возможность нанесения покрытия из любых материалов толщиной 0,1...10 мм.

**Детонационное напыление** – наносимые частицы приобретают энергию

во время горения и перемещения ацетиленокислородной смеси в стволе пушки. Детонация – особый вид горения газообразного топлива. Она возникает в начальный период горения смеси и распространяется по трубе со скоростью 2000...3000 м/с. Температура горения смеси при детонационном напылении достигает 5700 К, а развиваемое давление – сотен мегапаскалей. Скорость полета наносимых частиц 600...800 м/с, а их температура до 4000 К. Покрытия имеют малую пористость (до 0,5 %) и высокую прочность соединения с подложкой (до 200 МПа).

Наносимые частицы нагреваются за счет теплообмена с высокотемпературной газовой средой и перемещаются ударной волной, возникшей в результате детонации горючей газовой смеси в стволе установки (рис. 49).

Установка детонационного напыления включает водоохлаждаемый закрытый с одного конца ствол 5 длиной 1200...2000 мм и диаметром 8...40 мм. Внутренняя полость ствола вблизи торцевой стенки образует взрывную камеру 3. В ее стенке установлено запальное устройство 2 и клапанное устройство для подачи горючего и окислительного газов. В торце ствола имеется порошковый питатель 1. На расстоянии 150...200 мм от среза ствола перпендикулярно к оси располагают восстанавливаемую поверхность детали.

В установке имеется камера смешивания горючих газов с окислителем. Смешивание газов необходимо для равномерного распределения газовой смеси вдоль ствола. Газовые потоки в камере смешивания движутся под углом друг другу или закручиваются.

Для зажигания горючей смеси применяют автомобильные свечи.

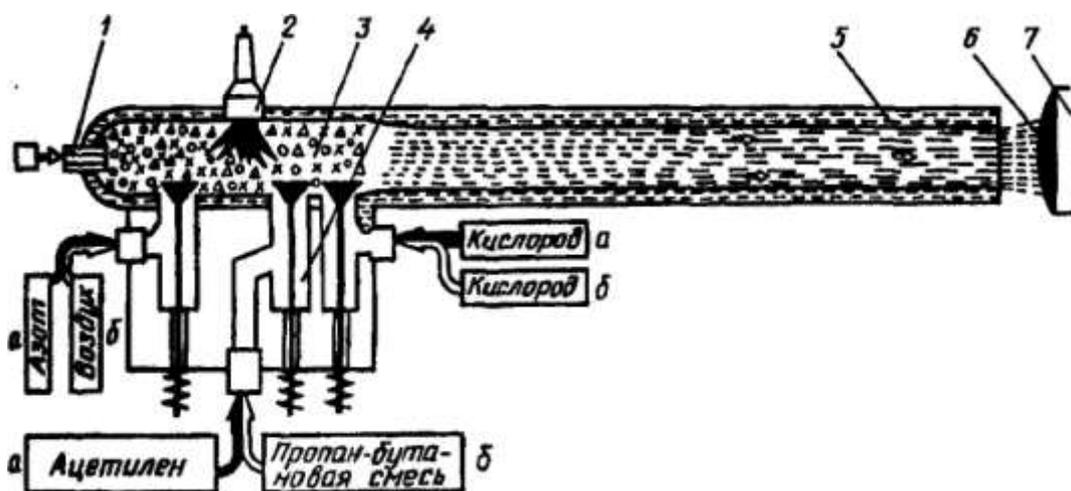


Рис. 49. Схема установки для детонационного напыления: а – базовой; б – усовершенствованной; 1 – порошковый питатель; 2 – запальное устройство; 3 – взрывная камера; 4 – смесительная камера; 5 – водоохлаждаемый ствол; 6 – покрытие; 7- восстанавливаемая деталь

**Индукционное напыление** – напыляемая проволока подается в индуктор, где нагревается и расплавляется вихревыми токами, возникающими за счет переменного магнитного поля. Расплавленный металл распыляется сжатым воздухом. Головка индукционного аппарата (рис. 50) имеет высокочастотный

индуктор и концентратор тока, который обеспечивает нагрев проволоки на небольшом участке. Частота тока  $f$  (Гц), необходимого для расплавления проволоки.

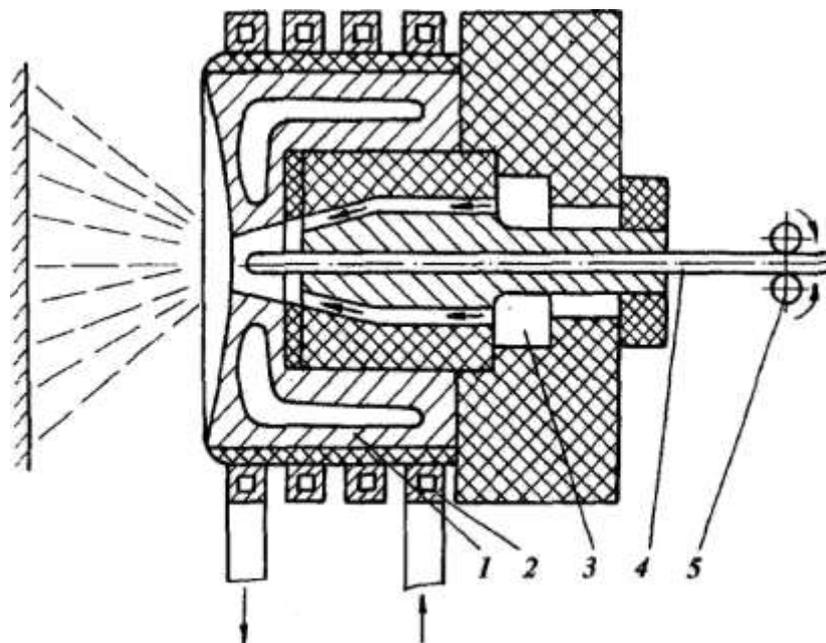


Рис. 50. Устройство для индукционного напыления: 1 – концентратор тока; 2 – индуктор; 3 – воздушный канал; 4 – проволока; 5 – подающие ролики

Индукционное напыление обеспечивает небольшое окисление металла и высокую прочность покрытий, но имеет невысокую производительность, а применяемое оборудование при этом сложное и дорогое.

### 10.6. Восстановление деталей методами пайки

Сущность пайки заключается в получении неразъемных соединений деталей в твердом состоянии при помощи расплавленного сплава (припоя), имеющего температуру плавления ниже, чем соединяемые детали.

Соединяемые детали нагревают до температуры, при которой припой полностью расплавляется, смачивает соединяемые поверхности и заполняет зазоры между ними. В процессе смачивания устанавливаются межатомные связи между поверхностными атомами соединяемых деталей и атомами расплавленного припоя.

Степень диффузии зависит от чистоты поверхностей соединяемых деталей, свойств припоя и металла соединяемых деталей, температуры пайки и времени выдержки при этой температуре. При охлаждении припой кристаллизуется и образует достаточно прочное соединение деталей.

*Припой.* В зависимости от температуры плавления припои делятся на две группы: низкотемпературные с температурой плавления до 450 °С и высокотемпературные с температурой плавления более 450 °С.

При ремонте автомобилей наиболее часто применяют:

- оловянно-свинцовые (до 280 °С),
- медно-цинковые (800...900 °С)
- припой для пайки алюминиевых сплавов (низкотемпературные на осно-

ве олова, цинка и кадмия 200°C...250°C применяют при невысоких требованиях к прочности соединений, высокотемпературные на алюминиевой основе имеют стойкость против коррозии и высокую прочность соединения.

Флюсы используют для удаления окислов, улучшения смачиваемости основного металла и растекания припоя. Состав флюса зависит от материала спаиваемых деталей. Наиболее известный – канифоль лучше всего подходит для пайки меди.

**Пайка низкотемпературными припоями.** Процесс состоит из подготовки деталей, собственно пайки и последующей обработки деталей. Подготовка поверхностей включает тщательную их подгонку друг к другу, очистку от загрязнений и окислов.

Поверхности подогревают до температуры плавления припоя, наносят флюс и производят лужение соединяемых поверхностей припоем для обеспечения хорошего механического сцепления припоя с основным металлом. С целью фиксации взаимного расположения деталей и обеспечения зазора между соединяемыми поверхностями в пределах 0,05...0,20 мм их прижимают друг к другу при помощи тисков или струбцин. Пайку выполняют при температуре, превышающей температуру плавления припоя на 40...50 °С.

После пайки детали медленно охлаждаются до полного затвердевания припоя.

Низкотемпературную пайку применяют для пайки радиаторов, коллекторов генераторов и стартеров, топливных баков, трубопроводов низкого давления, электрических проводов и др.

**Пайка высокотемпературными припоями.** Процесс также включает подготовку деталей к пайке, нагрев и пайку деталей, обработку деталей после пайки.

Подготовка деталей к пайке включает подгонку соединяемых деталей друг к другу, разделку кромок трещин, изготовление накладок для заделки пробоин, зачистку мест пайки от загрязнений и окислов и т. п. На поверхности деталей наносится соответствующий флюс и накладывается припой в виде проволоки, пластинки, кольца, изогнутых по форме шва или детали.

Пайку выполняют при температуре несколько выше температуры плавления припоя и выдерживают в течение времени, необходимого для расплавления припоя и заполнения им зазора между деталями. В зависимости от способа нагрева деталей применяют следующие виды пайки: газоплазменную, индукционную, электроконтактную, в печах и ваннах и др.

При газоплазменной пайке деталь нагревают сварочной горелкой. Пруток припоя вводится так же, как и при газовой сварке. Качество пайки высокое, но зависит от квалификации исполнителя в связи с трудностью контроля температуры нагрева деталей, создающего угрозу их перегрева и припоя.

### **10.7. Восстановление деталей с помощью электрохимических покрытий**

Процессы взаимного превращения химической и электрической форм энергии являются электрохимическими процессами. В свою очередь, они подразделяются на две группы: превращения химической энергии в электриче-

скую (в гальванических элементах) и электрической энергии в химическую (электролиз).

В простейшей электрохимической системе имеются два электрода и ионный проводник между ними (внутренняя цепь). Металлический проводник, замыкающий электроды с источником или потребителем электрической энергии, представляет собой внешнюю цепь.

В зависимости от места электролиза процессы делятся на ваннные и вневаннные, а в зависимости от температуры электролита электролиз протекает в горячих (больше 50 °С) или холодных электролитах.

Типовой процесс нанесения гальванических покрытий содержит три блока операций: подготовительные, осаждения металла и обработки заготовок после нанесения покрытий (рис. 51).

Восстановление деталей гальваническими покрытиями заключается в электролитическом осаждении металла на поверхность при прохождении тока через электролит, т. е. при электролизе.

В ремонтном производстве гальванические процессы применяются для:

- нанесения металлических покрытий на изношенные поверхности деталей (хромирование и железнение);
- нанесения защитно-декоративных покрытий (никелирование, меднение и цинкование).

Применяются и химические процессы: химическое никелирование, оксидирование и фосфатирование. При нанесении покрытий используется химическая энергия исходных компонентов.

Защитно-декоративные покрытия применяют для защиты деталей от коррозии и придания им красивого внешнего вида.

По роду защитного действия гальванические покрытия подразделяются на анодные и катодные. При соприкосновении двух металлов в присутствии коррозионной среды образуется гальваническая пара, в которой более электроотрицательный металл становится анодом и растворяется, а менее электроотрицательный – катодом.

При анодной защите металлов менее электроотрицательный металл покрывается более электроотрицательным, например железо покрывается цинком. В присутствии влаги цинк будет подвергаться коррозии, защищая тем самым железо от окисления.

При катодной защите более электроотрицательный металл покрывается менее электроотрицательным, например железо покрывается оловом. Защитное действие катодных покрытий заключается в изолировании поверхности деталей от воздействия коррозионной среды. К катодным покрытиям на стальных деталях относятся хромовые, никелевые, медные и др. Наибольшей прочностью обладают четырехслойные катодные покрытия, которые получают последовательным нанесением слоев никеля, меди, никеля и хрома. Первый слой никеля обеспечивает высокую прочность сцепления покрытия с деталью. Слой меди имеет небольшую пористость и обеспечивает хорошую защиту от коррозии. Второй слой никеля придает покрытию красивый внешний вид. Тонкий, полупрозрачный слой хрома защищает слой никеля от механических повреждений.



Рис. 51. Типовой процесс нанесения гальванических покрытий

Технологический процесс нанесения защитно-декоративных покрытий не отличается от процесса нанесения износостойких покрытий.

При гальваническом осаждении металла катодом является восстанавлива-

емая деталь, а анодом – металлическая пластина.

Аноды применяют двух видов: растворимые и нерастворимые. Растворимые аноды изготавливают из металла, который осаждается на детали, а нерастворимые – из свинца.

При прохождении постоянного тока через раствор электролита на катоде разряжаются положительно заряженные ионы, образуя гальванические покрытия, а водород выделяется в виде газа. На аноде разряжаются отрицательно заряженные ионы и выделяется кислород. Металл анода растворяется, и его атомы образуют новые ионы металла, переходящие в раствор взамен выделившихся на катоде. При использовании нерастворимых анодов электролит пополняется ионами металла посредством добавления в электролит веществ, содержащих ионы осаждаемого металла.

Детали обрабатывают в ваннах, корпус которых изготовлен из листовой стали толщиной 4...5 мм (рис. 52). Корпус ванны 8 вставлен в стальной кожух 5. Пространство между корпусом ванны и кожухом заполнено водой, служащей для равномерного подогрева электролита и поддержания его температуры в заданных пределах. Вода подогревается паром или электричеством. Внутренняя поверхность ванны облицована свинцом, винипластом, диабазовыми плитками на кислотоупорном цементе и другими кислотостойкими материалами.

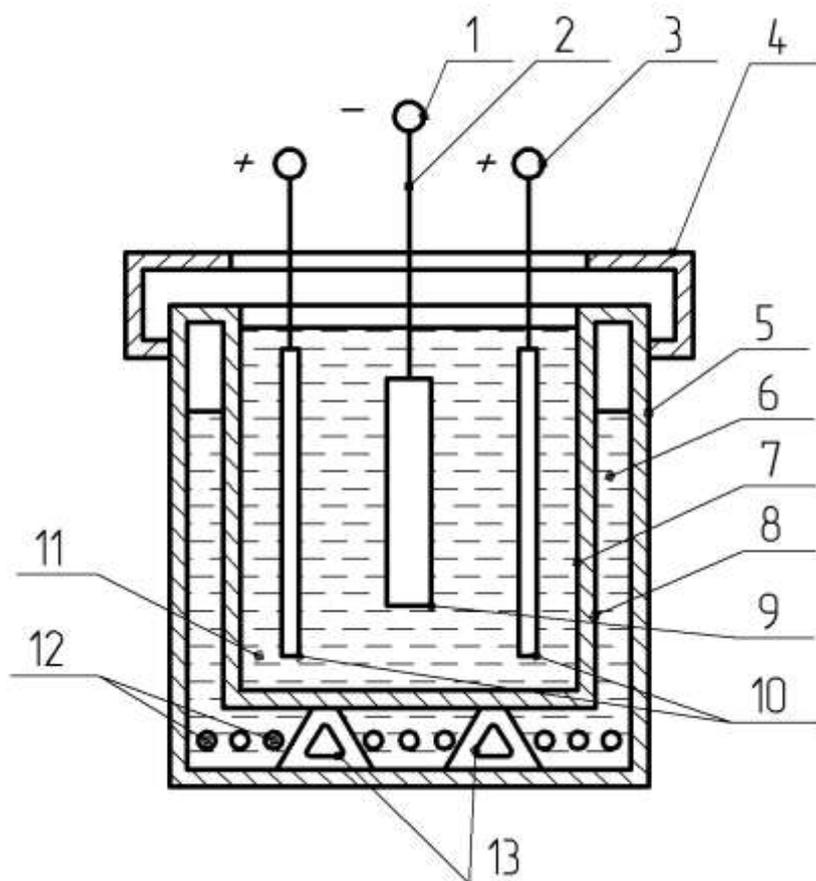


Рис. 52. Ванна для нанесения гальванических покрытий: 1 и 3 – катодная и анодная штанги; 2 – подвесное приспособление; 4 – вентиляционный отсос; 5, 7, 8 – кожух, футеровка и корпус ванны; 6 – вода; 9 – катод (деталь); 10 – анодные пластины; 11 – электролит; 12 – подогрев ванны

Удаление вредных испарений обеспечивается вентиляционными бортовыми отсосами 4. Для подвешивания анодных пластин 10 и деталей 9 в верхней части ванны в изоляторах установлены токопроводящие штанги 1 и 3 в виде сплошных стержней или труб, изготовленных из меди или латуни.

В процессе электролиза толщина покрытий на различных участках детали неодинакова.

Таблица 4

Основные виды гальванических покрытий

Вид покрытия	Толщина наносимого слоя, мм	Плотность осажденного металла, г/см	Электрохимический эквивалент, г/(А·ч)	Плотность тока, А/дм <sup>2</sup>	Выход металла по току, %
Хромирование: износостойкое	0,200...0,300	6,90	0,324	50...75	13...15
защитно-декоративное	0,001	6,90	0,324	20...25	13...15
Железнение: горячее	0,500...1,200	7,80	1,042	30...50	70...80
холодное	0,300...0,500	7,80	1,042	10...18	45...80
Цинкование	0,010	7,10	1,220	2	75
Меднение	0,003	8,91	2,372	1,5	75
Никелирование	0,020	8,85	1,094	3	95

Способность электролита давать равномерные по толщине покрытия называется **рассеивающей способностью электролита**. Рассеивающая способность электролита может быть повышена за счет изменения его состава. Электролиты с малой концентрацией основной соли имеют более высокую рассеивающую способность.

Свойство электролита обеспечивать покрытия на углубленных частях деталей независимо от его толщины характеризуется так называемой **кроющей способностью электролита**. С увеличением в электролите концентрации основной соли кроющая способность улучшается.

### 10.8. Способы восстановления деталей с помощью электрохимических покрытий

**Хромирование** получило широкое распространение благодаря ценным физико-механическим качествам хромового покрытия. Благодаря высокой твердости, низкому коэффициенту трения и высокой коррозионной стойкости хром обладает также высокой износостойкостью. Хром химически устойчив по отношению к большинству газов, щелочей и кислот, но в соляной и горячей концентрированной серной кислоте легко растворяется. Хорошо отполированная хромированная поверхность имеет высокие декоративные качества. Электролитический хром хорошо сцепляется со сталью, никелем, медью и ее спла-

вами.

Электролитическое осаждение хрома осуществляется из электролита, состоящего из водного раствора хромового ангидрида  $\text{CrO}_3$  и серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

В зависимости от назначения хромового покрытия различают твердое (износостойкое) и защитно-декоративное хромирование. Твердое хромирование применяют для восстановления изношенных поверхностей деталей, а также для повышения их износостойкости. Твердые хромовые покрытия могут быть двух видов: гладкие и пористые.

Гладкое хромовое покрытие плохо смачивается маслом, легко разрывается под воздействием нагрузок и вызывает повышенный износ сопряженных деталей. Этот недостаток устраняется при применении пористого хромирования.

Гладким хромовым покрытием восстанавливают стержни клапанов, направляющие поверхности толкателей, прецизионные пары топливной аппаратуры, изношенные шейки валов и осей и др. Пористое хромовое покрытие применяют для поверхности деталей, работающих в условиях высоких удельных нагрузок и граничного трения, например: поршневых колец двигателей и гильз цилиндров.

Защитно-декоративные покрытия характеризуются высокой долговечностью и применяются для защиты деталей от коррозии и придания им красивого внешнего вида.

К основным недостаткам процесса хромирования относятся: низкая производительность процесса; малый выход хрома по току – 12–15 %; малая толщина наносимого слоя покрытия; высокая стоимость покрытия.

Монтаж деталей осуществляют на специальных подвесных приспособлениях, которые должны обеспечить надежный контакт с восстанавливаемой деталью и токопроводящей штангой, получение равномерного покрытия и беспрепятственное удаление пузырьков водорода, выделяющегося при электролизе, не допустить экранирование отдельных участков деталей.

Изоляция мест, не подлежащих хромированию, снижает расход хрома и повышает производительность ванны. Для защиты поверхностей деталей применяют кислотостойкие краски (на нитроцеллюлозных основах), перхлорвиниловую изоляционную ленту, листовую резину, которыми плотно обвертывают защищаемые поверхности.

Хромирование начинают с плотности тока в 1,5 раза больше заданного технологическим процессом. Через 1...2 мин плотность тока снижают до заданного значения. Повышение плотности тока в начале электролиза обеспечивает осаждение хрома на углубленных участках детали сложной конфигурации. При хромировании в электролите, содержащем 150...200 г/л хромового ангидрида  $\text{CrO}_3$  и 1,5...2,0 г/л серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , при температуре 55...65 °С и плотности тока 40...60 А/дм<sup>2</sup> скорость осаждения хрома составляет 0,02...0,04 мм/ч. Время хромирования зависит от толщины необходимого покрытия. При хромировании применяют нерастворимые аноды, которые изготавливают из сплава свинца с 6 % сурьмы.

Качество покрытия контролируют по внешнему виду. Наличие темных

мест, непокрытых участков, отслаивание, шелушение и другие дефекты не допускаются.

**Проточное хромирование.** Восстановление поверхностей крупногабаритных деталей сложной формы вызывает большие трудности, связанные с изоляцией мест, не подлежащих покрытию, сложностью конструкции подвесных приспособлений и быстрым загрязнением ванны. Поэтому поверхности этих деталей при централизованном ремонте восстанавливают нанесением покрытия безваннным способом, при котором в зоне покрытия создают местную ванну и в нее принудительно подают электролит. Для хромирования в проточном электролите кроме ванны необходима специальная установка, включающая насос и систему трубопроводов для подачи электролита, площадку для установки детали, специальные цилиндрические аноды и их крепления. Аноды располагаются внутри хромируемой поверхности, а в пространство между ними подается электролит. При хромировании в электролите, содержащем 150 г/л хромового ангидрида  $\text{CrO}_3$  и 1,5 г/л серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , при расстоянии между анодами и поверхностью детали до 10...15 мм, скорости протекания электролита 8...100 см/с и плотности тока 150...200 А/дм<sup>2</sup> скорость осаждения хрома достигает 0,14...0,18 мм/ч.

Хромирование в проточном электролите применяется для восстановления внутренних рабочих поверхностей блоков цилиндров, отверстий под подшипники в картере коробки передач, картере сцепления и др. Благодаря принудительной циркуляции электролита обеспечиваются высокая равномерность покрытия по всей поверхности и получение мелкодисперсной структуры. Осадки получают повышенной твердости и износостойкости.

**Железнение** применяется в основном для восстановления изношенных поверхностей деталей. Твердым электролитическим железом восстанавливаются цилиндрические поверхности толкателей, клапанов, шейки валиков масляного и водяного насосов, шейки вала рулевой сошки, шейки валов коробки передач и др.

Железо, осаждаемое на детали электролитическим путем, представляет собой металл серебристо-белого цвета с мелкокристаллической структурой. По своему составу оно приближается к малоуглеродистой стали. При определенных составах электролита и режимах электролиза получают осадки железа с твердостью 51...57 HRC. Гальванические осадки железа характеризуются высокой износостойкостью. Покрытия можно получить большой толщины: гладкие покрытия твердостью до 300 НВ можно получить толщиной до 3 мм; покрытия более высокой твердости до 57 HRC, – толщиной 0,8...1,2 мм. Свойства покрытий зависят от режима их нанесения. С повышением плотности тока и понижением температуры электролита увеличивается твердость покрытия. Мягкие покрытия, получаемые при температуре электролита 90 °С и выше, не пригодны для восстановления и упрочнения деталей без термической обработки. Распространение получили покрытия средней и высокой твердости, осаждаемые при температуре 60...80 °С при плотности тока 20...50 А/дм<sup>2</sup>, позволяющей наращивать покрытия со скоростью 0,2...0,5 мм/ч. Прочность сцепления покрытия с основным металлом достаточно высокая, обеспечивающая надеж-

ную работу восстановленной детали.

Технологический процесс железнения, как и хромирования, состоит из трех стадий: подготовки деталей к нанесению покрытия, нанесения покрытия и обработки деталей после нанесения покрытия.

Подготовка деталей к нанесению покрытия аналогична их подготовке при хромировании.

Железнение начинают при плотности тока  $1...5 \text{ А/дм}^2$ , а затем в течение  $5...10$  мин увеличивают ее до заданного значения. В этот период на поверхности детали формируется сплошной граничный слой покрытия. Для получения твердых износостойких покрытий применяют электролит следующего состава:  $200...250 \text{ г/л}$  хлористого железа  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ;  $0,7...1,0 \text{ г/л}$  соляной кислоты  $\text{HCl}$ ;  $20...30 \text{ г/л}$  хлористого марганца  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Плотность тока  $30...40 \text{ А/дм}^2$ , температура электролита  $60...80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Время железнения зависит от требуемой толщины покрытия. Анодами служат пластины из стали 10 или 20. Полученное покрытие должно быть гладким, без большого количества бугорков, разрывов, шелушения и других видимых дефектов.

Хлористые электролиты обладают повышенной агрессивностью, поэтому железнение производится в стальных ваннах со специальным покрытием (углеграфитовыми плитками). Для уменьшения загрязнения электролита шламом, который образуется при растворении анодов, их помещают в чехлы из кислотоустойчивой ткани. Кроме того, для получения качественного покрытия электролит подвергается фильтрации. Установка для непрерывной фильтрации состоит из насоса и фильтра, включенных последовательно.

По сравнению с хромированием, процесс железнения имеет следующие преимущества: применение простого и дешевого электролита; более высокая рассеивающая способность электролита; получение покрытия толщиной  $1,0...1,2 \text{ мм}$ ; более низкая стоимость процесса. К недостаткам железнения относятся сложность подготовки деталей к нанесению покрытия, необходимость фильтрации и корректировки электролита.

Железнение в гальванических ваннах крупных деталей сложной конфигурации вызывает затруднения из-за необходимости изоляции значительного числа поверхностей и больших размеров ванн. В связи с этим получило распространение железнение вне ванн для восстановления посадочных мест под подшипники в картере коробки передач, в картере заднего моста, в корпусе водяного насоса и др.

Восстанавливаемую поверхность зачищают наждачной шкуркой, обезжиривают растворителем, венской известью и промывают горячей и холодной водой. При помощи специального приспособления создается емкость для электролита, т. е. гальваническая ванночка (рис. 53).

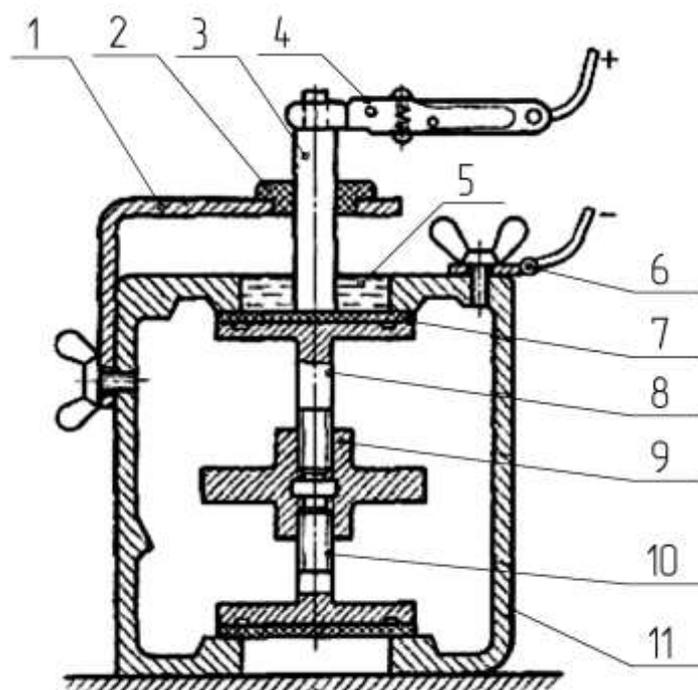


Рис. 53. Приспособление для железнения вне ванны:

- 1 – угольник для центрирования и крепления анода; 2 – эбонитовая втулка;  
 3 – анод; 4 – быстросъемный зажим; 5 – электролит; 6 – катодный контакт;  
 7 – резиновая пластина; 8 – верхний прижим с левой резьбой;  
 9 – зажимная гайка; 10 – нижний прижим с правой резьбой;  
 11 – картер коробки передач

**Электролитическое натирание.** Процесс является разновидностью электролитических покрытий вне ванн и не требует применения сложного оборудования и оснастки. Электролитическим натиранием восстанавливают цилиндрические поверхности деталей, имеющих небольшой износ. В зависимости от применяемого электролита на поверхность деталей наносят покрытия из цинка, железа, меди, хрома и других металлов.

Восстанавливаемую деталь, являющуюся катодом, устанавливают в патрон токарного станка или специального приспособления. Анодом является стержень из нержавеющей стали, покрытый адсорбирующим материалом (сукном, хлопчатобумажной тканью), образующим тампон. На тампон непрерывно подается электролит, поступающий из резервуара 1 (рис. 54). При включении тока в области контакта анода 2 и детали 3 происходит процесс электролиза, и на поверхности детали откладывается слой металла. Стекающий с детали электролит собирается в ванну для повторного использования.

Основными преимуществами процесса электролитического натирания по сравнению с обработкой поверхности вне ванн являются: возможность применения больших плотностей тока, обеспечивающих высокую производительность процесса; простота применяемого оборудования; возможность нанесения покрытий на любые участки деталей всевозможных размеров и конфигурации.

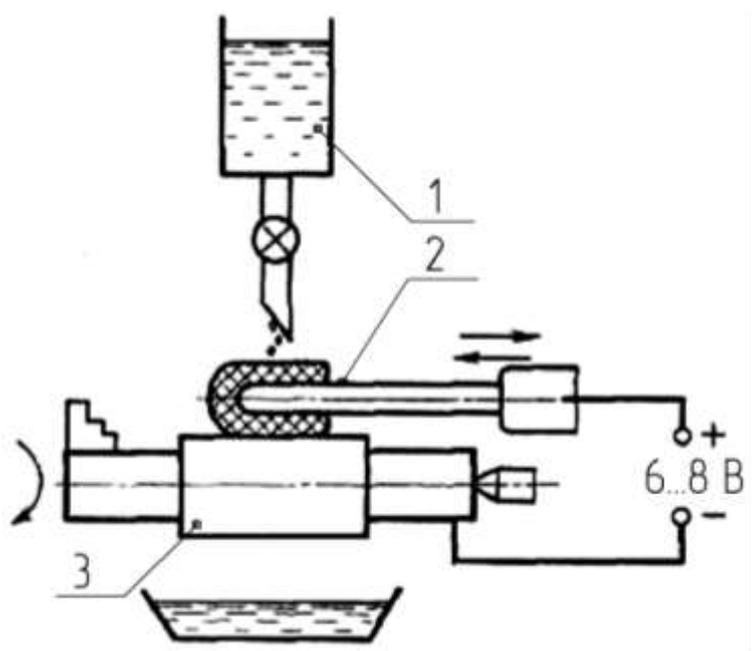


Рис. 54. Схема нанесения покрытий электролитическим натиранием

**Электролитическое никелирование** применяют в авторемонтном производстве в качестве подслоя при декоративном хромировании. При никелировании применяют растворимые аноды из электролитического никеля. Слой никеля образуется в течение 20 мин.

**Химическое никелирование.** Сущность процесса заключается в получении никель-фосфорных покрытий контактным способом из специальных растворов без применения электроэнергии. Особенностью процесса является равномерное образование покрытия на деталях сложного профиля. Никель осаждается с одинаковой скоростью на любых участках изделия, если они соприкасаются с раствором и поверхность подготовлена соответствующим образом.

**Меднение.** Электролитическое меднение применяют в качестве подслоя при защитно-декоративном покрытии стальных деталей, для защиты поверхностей деталей при цементации, для зубьев шестерен, червяков и других деталей с целью улучшения плавности их зацепления и облегчения приработки. При меднении в электролите, содержащем 200...250 г/л сернокислой меди, 50...60 г/л серной кислоты, и при температуре 27 °С плотность тока составляет 5 А/дм<sup>2</sup>. При меднении применяют растворимые аноды из меди.

**Цинкование** применяют в основном для защиты крепежных деталей от коррозии. При цинковании в электролите, содержащем 200...250 г/л сернокислого цинка, 30 г/л сернокислого алюминия, 30...100 г/л сернокислого натрия, 10 г/л декстрина, и при температуре 18...25 °С плотность тока составляет 1...2 А/дм<sup>2</sup>. Цинкование производится в специальных вращающихся установках – колоколах. Анодом служит цинковая пластина, помещаемая в центре вращающегося колокола.

Для защиты стальных деталей от коррозии применяют также химическую обработку – оксидирование и фосфатирование.

**Оксидирование** стальных деталей (воронение) состоит в создании на их поверхности оксидной пленки, которая имеет высокую прочность и надежно

защищает металл в легких коррозионных условиях. Химическое оксидирование производится в стальной ванне, в которую погружают детали на подвесках или в проволочных корзинах. В растворе, содержащем 500...700 г/л каустической соды, 50...100 г/л азотнокислого натрия, 150...250 г/л азотисто-кислого натрия, оксидирование производится при температуре 135...145 °С в течение 10...30 мин. Декоративные и защитные свойства оксидированных деталей повышаются после их пропитки в машинном масле при температуре 110...115 °С.

**Фосфатирование** состоит в создании на поверхности защищаемого металла пленки, состоящей из нерастворимых фосфорнокислых солей марганца и железа. Благодаря хорошей адгезии фосфатные покрытия применяют в качестве грунта под лакокрасочные покрытия. Химическое фосфатирование производят в стальных ваннах. В растворе, состоящем из солей марганца, железа и фосфорной кислоты, фосфатирование производится при температуре 97...99 °С в течение 1...2 ч.

Защитная способность фосфатных покрытий выше, чем у оксидных пленок. Фосфатная пленка имеет высокую коррозирующую стойкость в нефтепродуктах. В щелочах и кислотах покрытия неустойчивы.

**Микродуговое оксидирование (МДО)** Основано на использовании особенностей электрохимических и микроплазменных процессов и позволяет получать на поверхности вентильных металлов (алюминия, титана, циркония, тантала и др.) оксидные покрытия (рис. 55).

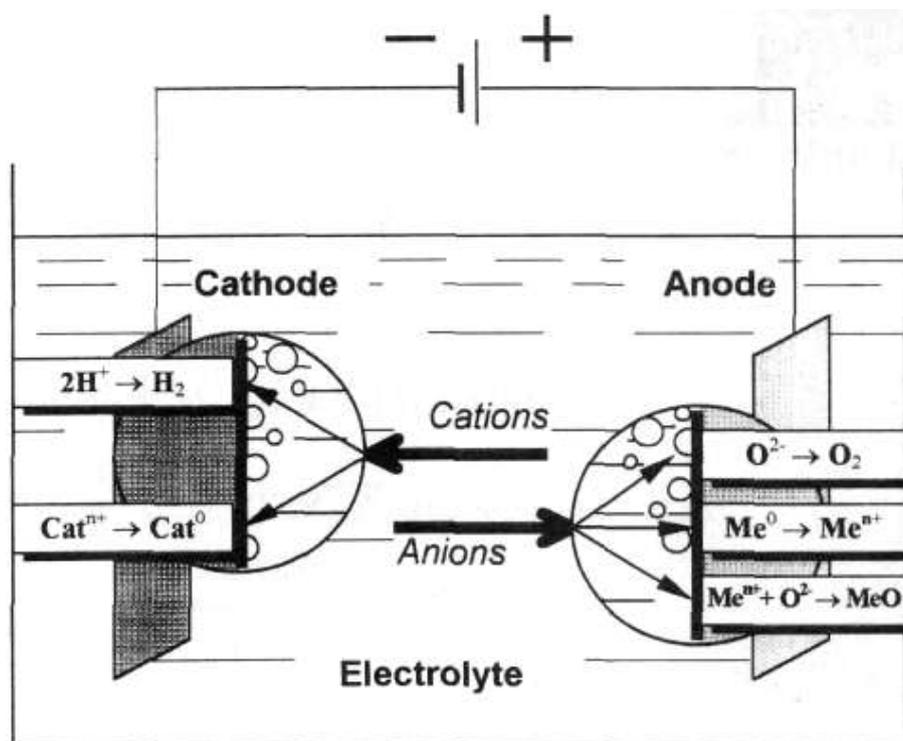


Рис. 55. Формирование покрытия

В восстановительном производстве нашло применение МДО деталей из алюминиевых сплавов (Д16Т, АМг, АМц и др.). На поверхности формируются керамические покрытия, в состав которых входят оксиды  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Толщина покрытий достигает 60 мкм, а шероховатость поверхности Ra 0,63 мкм. В ряде случаев механическую обработку после нанесения покрытий не проводят.

При микродуговом оксидировании используют три вида электролитов:

- 1) растворы кислот или щелочей, в которых преобразование слоев металла направлено вглубь за счет его окисления;
- 2) растворы жидкого стекла, анионы которого формируют покрытие, растущее наружу;
- 3) смесь растворов первого и второго видов, где покрытие формируется как вглубь металла, так и наружу за счет окисления металла и осаждения анионов.

По причине значительного тепловыделения при МДО электролит может нагреться до кипения, поэтому ванну снабжают рубашкой водяного охлаждения. При испарении электролита его уровень повышают добавлением дистиллированной воды.

Последующую механическую обработку покрытий ведут абразивным инструментом на эластичной связке.

Отличительной особенностью МДО является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микрозарядов, оказывающих значительное воздействие (термическое, плазмохимическое и др.) на формирующееся покрытие и электролит, в результате чего состав и структура получаемых оксидных слоев существенно отличается, а свойства значительно выше по сравнению с обычными анодными пленками. Другими отличительными характеристиками процесса МДО является его экологичность, относительная универсальность, а также отсутствие необходимости тщательной предварительной подготовки обрабатываемой поверхности в начале технологической цепочки.

Технологическая установка для нанесения МДО-покрытий (рис. 56) состоит из источника технологического тока (ИТТ) 6 и технологической ванны 1, соединенной с емкостью для охлаждения электролита 5 и змеевиком 4, соединительными шлангами 3. Насос 2 служит для перекачки электролита из одной ванны в другую. Деталь 7 помещается в электролит и закрепляется на токоподводной шине.

При пропускании через цепь переменного тока от ИТТ на поверхности обрабатываемой детали появляются микродуговые разряды. В каналах разрядов происходят плазмохимические реакции, в ходе которых поверхностный слой детали преобразуется в высокотемпературные модификации оксидов алюминия.

Основными технологическими факторами МДО являются плотность тока, состав и концентрация электролита, время обработки.

Основные физико-механические характеристики МДО-покрытий приведены в табл. 5.

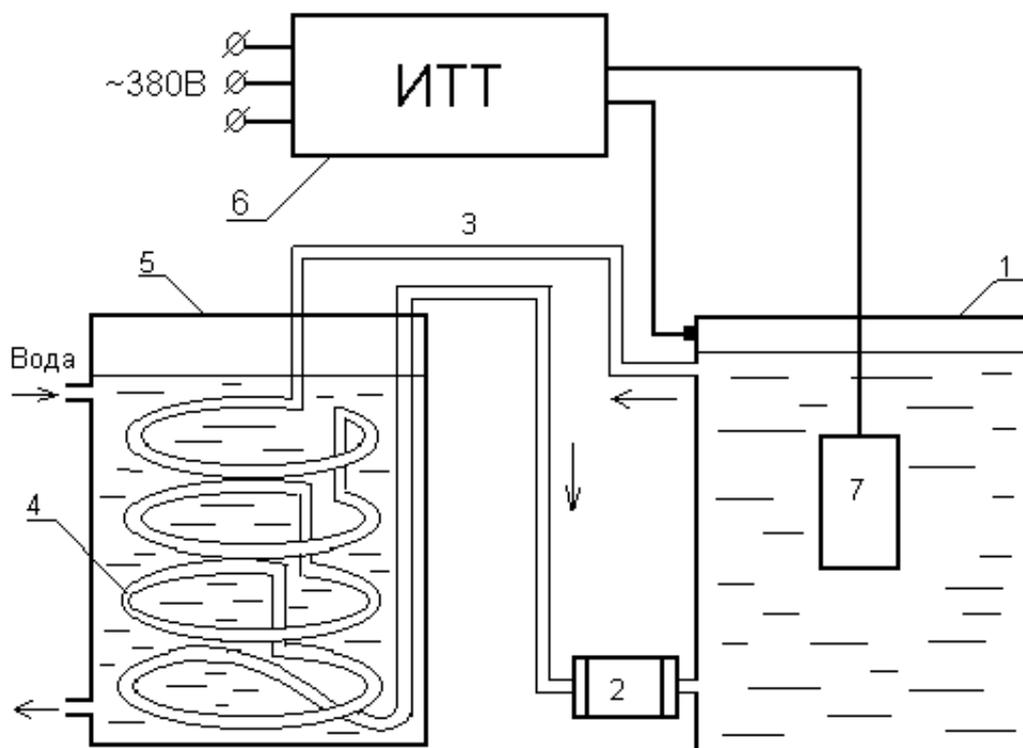


Рис. 56. Схема установки для МДО

#### Достоинства:

- покрытия являются многофункциональными;
- могут использоваться в качестве промежуточного слоя для дальнейшего нанесения защитных лакокрасочных, полимерных и других покрытий;
- возможность нанесения покрытия на сложнопрофильные изделия, внутренние поверхности и скрытые полости;
- процесс не требует высокой специализации персонала;
- высокая адгезия покрытия, сопоставимая с прочностью материала подложки;
- получение покрытий без предварительной подготовки поверхности;
- возможность полной автоматизации процесса;
- дешевизна и доступность реактивов и материалов, простота оборудования;
- широкие возможности регулирования скорости процесса;
- экологическая безопасность, не требующая использования специальных очистных сооружений и т. д.;
- незначительное изменение размеров деталей после МДО;
- повышенное сопротивление хрупкому разрушению.

**Недостаток:** высокая энергоемкость.

**Область применения:** различные области промышленности с целью создания покрытий: износостойких, коррозионностойких, диэлектрических, теплостойких, эрозионностойких, химически стойких и декоративных. В отдельных случаях появляется возможность замены деталей из нержавеющей и жаростойких сталей на детали из алюминиевых сплавов. Упрочнение стальных де-

талей методом МДО может быть выполнено после напыления на них алюминиевых покрытий.

Таблица 5

Основные физико-механические характеристики МДО-покрытий

Толщина	до 800 мкм
Адгезия покрытия	до 350 МПа
Высокая микротвердость покрытия	до 25 ГПа
Удельное электросопротивление	до $2 \times 10^{14}$ Ом $\times$ м
Диэлектрическая прочность	10–20 В/мкм
Теплостойкость	выдерживает тепловой удар до 2500 °С
Пробойное напряжение	до 6000 В
Коррозионная стойкость	балл 1 по десятибалльной шкале
Износостойкость	на уровне твердых сплавов
Пористость	2-50% (регулируемая)
Чистота поверхности	Rz~1–40 мкм (без удаления технологического слоя) и Ra~0,04–0,08 (после полирования)
Размер зерен	1–10 мкм
Низкий коэффициент трения	0,005–0,01
Повышенная пластичность, в отличие от напыленной керамики	
Пьезоэлектрические свойства	

**Электроэрозионный синтез покрытий (ЭЭСП)** заключается в нанесении на деталь экзотермической смеси порошков металлов с неметаллами и органическими связками и последующей искровой обработке. Схема процесса представлена на рис. 57.



Рис. 57. Технологическая схема процесса ЭЭСП

Источник импульсов тока 1 подключен к вибратору 2 и к паре электрод 3 – деталь 4. Между вибрирующим электродом и деталью возникает искра, которая поджигает экзотермическую смесь 5.

В зоне искрового воздействия возникает термический процесс, который приводит к химическим реакциям, преобразующим исходные компоненты смеси в сложные соединения покрытия (например, на основе карбидов титана, хрома, вольфрама, диборида титана и других соединений) в зависимости от состава исходной смеси. Основные физико-механические параметры ЭЭСП приведены в табл. 6.

Таблица 6

Основные параметры ЭЭСП

Толщина	0,01–0,2 мм
Высокая микротвердость покрытия	800–3000 МПа
Напряжение холостого хода	10–70 В
Сила тока в импульсе	5–150 А
Частота импульсов	0,5–250 кГц
Скважность импульсов (отношение длительности импульса к периоду колебания)	0,1–0,9
Частота вибрации электрода	50–150 кГц
Приращение размера детали после нанесения ЭЭС-покрытия	0,01–0,1 мм
Шероховатость	Ra 2–7 мкм
Глубина диффузного слоя	0,01–0,4 мм

**Достоинства:**

- высокая производительность;
- высокая адгезия покрытия к основному материалу;
- незначительная мощность источника тока, питаемого от бытовой электросети;
- малые габариты установки и, как следствие, возможность использования в нестационарных условиях;
- отсутствие специальных требований к подготовке поверхностей;
- возможность нанесения покрытий на локальных участках поверхностей, в том числе, труднодоступных;
- технологическая простота нанесения покрытия вручную или механическим способом;
- отсутствие необходимости изготавливать специальные электроды, так как покрытие синтезируется непосредственно на поверхности детали.

**Недостаток:** высокая шероховатость поверхности при высокой твердости. Для снижения шероховатости после ЭЭСП применяется ППД.

**Область применения:**

- упрочнение поверхностей деталей, подверженных сильному износу, в том числе абразивному (пары трения, прессовый и штамповый инструмент, лопатки дробеметных машин, сопла для пескоструйной обработки, режущий инструмент и др.);

- упрочнение деталей машин на стадии их изготовления;
- восстановление размера деталей с одновременным упрочнением.

### **10.9. Использование полимеров для восстановления деталей**

При восстановлении деталей все более широкое применение находят различные виды синтетических материалов (полимеров). Их используют для восстановления следующих дефектов:

- наращивания изношенных поверхностей;
- устранения механических повреждений;
- восстановления посадок;
- нанесения защитных и декоративных покрытий;
- соединения деталей склеиванием;
- герметизации стыков;
- изготовления некоторых деталей.

Использование для этих целей синтетических материалов обусловлено их высокими физико-механическими свойствами, низкой трудоемкостью технологических процессов ремонта (в большинстве случаев не требуется трудоемкой разборки-сборки узла), низкой стоимостью, доступностью (нет необходимости в использовании сложного специального оборудования). Кроме того, они являются одним из немногих видов покрытий, нанесение которых не вызывает снижения усталостной прочности восстановленных деталей.

По назначению синтетические материалы подразделяются на две группы. Первая группа – это термополимеры, которые находятся уже в готовом (полимеризовавшемся) состоянии в виде гранул, порошка и т. п. Для использования их расплавляют, а затем при охлаждении они снова становятся твердыми. Полимеры этой группы используются для создания защитных, декоративных и антифрикционных покрытий, для восстановления посадок и для склеивания.

Вторая группа – это полимеры, которые полимеризуются в процессе использования в основном из жидкого состояния. Применяются для заделки пробоин, трещин, герметизации, восстановления посадок, склеивания, стопорения и фиксации, защиты от коррозии. К ним относятся различные клеи, компаунды, шпаклевки, анаэробные герметики, эластомеры, герметизирующие жидкие прокладки и ряд других материалов.

Для восстановления цилиндрических поверхностей деталей применяют порошкообразные полиамиды. Покрытия полиамидных (капроновых) порошков обладают высокой механической прочностью, хорошими антифрикционными свойствами и износостойкостью, низким коэффициентом трения. В распыленном состоянии порошки обладают высокой адгезией к металлу, стойки к воздействию органических кислот и масел. Наиболее широкое распространение получили следующие способы напыления: вихревой, вибрационный, газопламенный. Для напыления используют порошки, полученные механическим или химическим путем из гранул полиамидов. Для снятия внутренних напряжений покрытые полиамидами детали подвергают термической обработке путем их нагрева в масле до температуры 140...160 °С в течение 15...60 мин. После охлаждения производят механическую обработку покрытия детали. Порошко-

вые пластмассы наносят также путем их напыления на предварительно подогретую поверхность детали. При этом деталь подогревают до температуры плавления пластмассы. Частицы порошка, попадая на нагретую поверхность детали, расплавляются и образуют покрытие.

Синтетические клеи широко применяют при ремонте благодаря существенным преимуществам клеевых соединений по сравнению с заклепочными, сварными и другими видами крепления. Основными их достоинствами являются: возможность соединения разнородных металлов, устойчивость к воздействию топлив и смазочных материалов, способность выдерживать высокие рабочие температуры, простота и дешевизна склеивания.

Поверхности деталей, подлежащие склеиванию, тщательно очищают от загрязнений, обезжиривают и придают им шероховатость. Затем наносится слой клея и производится его полимеризация. Время и температура полимеризации клея зависят от марки и указаны в инструкции по его применению. Нанесение толстых (до 0,50 мм) слоев клея резко снижает прочность соединения (кроме эпоксидных клеев). Для некоторых типов клеев необходимо нанести два-три слоя клея толщиной 0,10...0,15 мм с сушкой каждого из них.

Наиболее прочное склеивание достигается применением эпоксидных и акриловых (цианоакрилатных) клеев.

Одной из разновидностей склеивания деталей является стопорение резьбовых соединений фиксаторами резьб. Данные составы представляют собой метакриловые клеи, полимеризующиеся в отсутствие кислорода воздуха (т. е. после закручивания резьбы). Фиксаторы резьб бывают слабой фиксации, средней (откручивающиеся ручным инструментом) и сильной фиксации (разборка после нагрева до 200–300 °С). Использование фиксаторов исключает самоотвинчивание соединений, повышает антикоррозийную защиту и увеличивает нагрузочную способность резьбы.

**Эпоксидные компаунды** используют для устранения трещин и пробоин, неплотностей сварки и пайки в корпусных деталях, для восстановления в них посадочных поверхностей под подшипники и для очень прочного склеивания деталей.

Компаунд, как правило, состоит из эпоксидной смолы, пластификатора, наполнителя и отвердителя. Эпоксидная смола (связующее) является основой компаунда и придает ему главные качества – прочность, водостойкость, высокую адгезию.

Пластификаторы повышают эластичность и пластичность эпоксидных композиций, их стойкость к температурным колебаниям.

Наполнители повышают механическую прочность, теплостойкость, теплопроводность эпоксидных композиций, уменьшают их хрупкость и усадку. В качестве наполнителей используют стальной или чугунный порошок, алюминиевую пудру, асбест, порошки слюды и графита, стекло- и углеволокно и другие материалы.

Отвердители предназначены для полимеризации, т. е. превращения эпоксидных композиций из жидкого состояния в твердое.

В большинстве случаев поставляемые в продажу эпоксидные компаунды

состоят из двух частей (упаковок): в часть А входит связующее, пластификатор и наполнитель, часть Б – это отвердитель. Перед использованием компоненты тщательно смешиваются.

Трещины эпоксидными композициями заделываются следующим образом. Вначале для снятия концентраторов напряжений засверливают ее концы сверлом диаметром 3...4 мм. Затем трещину разделяют шлифовальным кругом на гибком валу или при помощи зубила и молотка под углом 90...120° на глубину 0,7...0,8 толщины стенки. Вдоль трещины по обе стороны на расстоянии 15...20 мм поверхность зачищают шлифовальным кругом или наждачной шкуркой. Подготовленную поверхность обезжиривают ацетоном при помощи кисти с последующей выдержкой в течение 5 мин до полного испарения растворителя. В засверленные отверстия вставляют асбестовые пробки и утопляют их на 3/4 глубины. Выбранный по свойствам компаунд готовят к использованию (т. е. тщательно перемешивают компоненты). Затем его при помощи шпателя наносят в подготовленный шов в два слоя. Вначале наносят тонкий слой, тщательно втирая его в материал шва. Второй слой наносят с таким расчетом, чтобы он заполнил всю трещину с перекрытием кромок на 10...15 мм при толщине слоя 2...3 мм. Для ускорения процесса сушки и получения высокого качества отвержденного состава деталь нагревают до температуры 60...70 °С и выдерживают на время полимеризации (от 0,5 до 5 часов). Наплывы и потеки компаунда удаляют шабером, напильником или шлифмашинкой. Отремонтированные детали проверяют наружным осмотром или гидравлическим испытанием.

Тонкие трещины и небольшие раковины устраняют эпоксидной композицией, в которую входят только эпоксидная смола и отвердитель. Для повышения прочности и герметичности устраняемых трещин и пробоин применяют стеклоткани.

Пробоины в корпусной детали устраняют двумя способами: постановкой заплат внахлестку и заподлицо (рис. 58). При наложении заплат внахлестку по периферии пробоины сверлят отверстия диаметром 3,0...3,5 мм на расстоянии 20...30 мм одно от другого. Поверхность вокруг пробоины зачищают до металлического блеска и обезжиривают. На подготовленную поверхность наносят тонкий слой эпоксидной композиции и заполняют просверленные отверстия. Затем накладывают металлическую накладку 1 толщиной 0,5...0,8 мм или накладку из стеклоткани, чтобы она на 15...20 мм перекрывала края пробоины, и слегка прижимают или прикатывают ее. На поверхность накладки в зависимости от размеров пробоины поочередно наносят 3...5 слоев эпоксидной композиции и стеклоткани с прикаткой их роликом.

При наложении заплат заподлицо с поверхностью детали применяют металлическую накладку 3, которую с помощью закрепленной на ней проволоки 4 прижимают к поверхности пробоины. Затем поочередно накладывают слои эпоксидной композиции и стеклоткани. После отверждения композиции снимают металлическую пластину и отрезают концы проволоки.

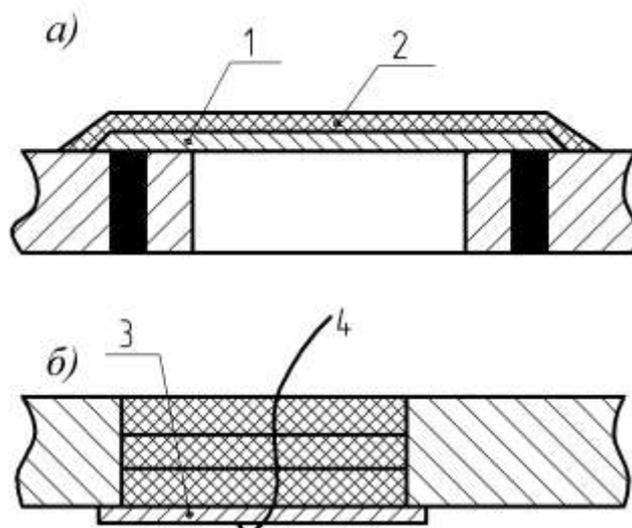


Рис. 58. Устранение пробоев постановкой заплат на эпоксидном компаунде: *а* – внахлестку; *б* – заподлицо; 1, 3 – металлическая накладка; 2 – клеевая заклепка; 4 – проволока

Нанесением эпоксидных компаундов восстанавливают и изношенные (до 1–2 мм) посадочные поверхности под подшипники и неподвижные сопряжения (крестовины карданных валов, посадки рычагов на осях, втулок, шкивов и т. д.) Если соединение должно быть разъемным, поверхность неизношенной детали смазывают тонким слоем масла.

После отверждения компаунда восстанавливаемые поверхности обрабатывают на металлорежущих станках или слесарно-механическим инструментом. Герметичность корпусных деталей проверяют на стендах для гидравлического испытания.

**Анаэробные полимеры.** Все более широкое применение получают анаэробные клеи и герметики на акриловой основе. Это синтетические жидкие составы, способные длительное время в присутствии кислорода воздуха оставаться в исходном состоянии и быстро полимеризоваться при комнатной температуре в узких зазорах соединяемых деталей при нарушении контакта с кислородом воздуха с образованием прочного полимерного слоя. На скорость отверждения анаэробных полимеров (от нескольких секунд до нескольких часов) влияет зазор между соединяемыми деталями, температура при отверждении, отсутствие контакта с воздухом, характер покрытия поверхностей деталей и чистота этих поверхностей. Существуют и двухкомпонентные составы, полимеризующиеся после смешения компонент.

Технологический процесс восстановления и фиксации неподвижных соединений включает выбор марки анаэробного герметика, подготовку сопрягаемых поверхностей деталей, нанесение анаэробного герметика, сборку соединения. Для анаэробных герметиков с различной вязкостью рекомендуются максимальные зазоры в сопряжениях, которые они способны герметизировать – 0,07...0,60 мм.

Подлежащие сборке или герметизации поверхности деталей очищают от ржавчины и окалины механическим способом, масляные и другие загрязнения

удаляют органическими растворителями. Неметаллические материалы, отличающиеся большой пористостью, не обезжиривают, а зачищают шлифовальной шкуркой. На очищенную и обезжиренную поверхность наносят герметик с помощью капельницы флакона или при помощи кисти, шпателя.

В отвержденном состоянии анаэробные герметики нерастворимы в органических растворителях, обладают хорошей химической стойкостью, устойчивы к действию высоких механических нагрузок и переменных температур, стойки к ударам и вибрации, обеспечивают уплотнение изделий с высокой степенью герметичности.

С помощью герметиков восстанавливают посадочные поверхности деталей в неподвижных соединениях, обеспечивают герметизацию и стопорение резьбовых соединений, устраняют пористость поверхностей деталей после наплавки и напыления покрытия, герметизируют сварные швы.

**Жидкие прокладки** – вид герметизирующего материала, дающий повышение надежности соединений в узлах, снижение трудоемкости и стоимости работ по их уплотнению. Они представляют собой полимерные композиции различной степени вязкости. Изменяя форму в процессе сборки соединений, жидкие прокладки заполняют все микронеровности, царапины, риски и вмятины на поверхностях деталей и обеспечивают герметичность соединения. Жидкие прокладки могут применяться самостоятельно или в сочетании с твердой прокладкой. Они стойки к вибрациям, ударам и могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур и давлений.

Технологический процесс нанесения жидкой прокладки состоит из подготовки поверхностей соединения, нанесения жидкой прокладки, выдержки на воздухе, сборки соединения, закрытой выдержки до начала эксплуатации агрегата.

Для обеспечения приклеивания прокладки соответствующую поверхность сопрягаемой детали подвергают обработке шлифовальной шкуркой, очистке шпателем с последующим обезжириванием органическим растворителем. Существующая масляная пленка на другой из сопрягаемых поверхностей предотвращает приклеивание к ней прокладки. Жидкую прокладку наносят на поверхность соединения выдавливанием валика из тубы с последующим разравниванием шпателем слоя прокладки. Отверждение прокладки происходит за счет ее взаимодействия с атмосферной влагой, начинается с поверхностного слоя и продолжается по мере диффузии влаги воздуха в глубь материала. Отверждение осуществляется за 10 мин, а эксплуатация агрегата допускается через 20...30 мин после нанесения жидкой прокладки.

Жидкие прокладки различных марок надежно заменяют картонные, паронитовые, резиновые. В отдельных случаях их можно использовать вместо асбестовых, пробковых, фибровых и других прокладок.

**Вихревое напыление** заключается в том, что предварительно обезжиренную и подогретую до температуры 280...300 °С деталь помещают в специальную камеру, где пластмассовый порошок под действием сжатого газа находится во взвешенном состоянии, оседает на нагретую поверхность детали и расплавляется на ней. Камера 4 вихревого напыления разделена пористой пере-

городкой 5 на две части (рис. 59). В нижнюю часть камеры подается сжатый воздух или азот. Сверху на пористую перегородку насыпают порошок пластмассы. Сжатый газ, проходя с определенным давлением через пористую перегородку, взвихривает его в камере. Время выдержки детали в камере зависит от необходимой толщины покрытия. Вихревое напыление обеспечивает получение покрытия толщиной 0,1...0,5 мм.

**Вибрационное напыление** заключается в том, что на помещенную в специальную камеру обезжиренную и подогретую деталь оседает пластмассовый порошок, который поддерживается во взвешенном состоянии с помощью электромагнитного вибратора. Для поддержания порошка во взвешенном состоянии частота вибрации должна составлять 50...100 Гц. Вибрационное напыление обеспечивает получение толщины покрытия до 1 мм. Тонкостенные быстроохлаждающиеся детали после нанесения покрытия нагревают повторно до оплавления порошка покрытия.

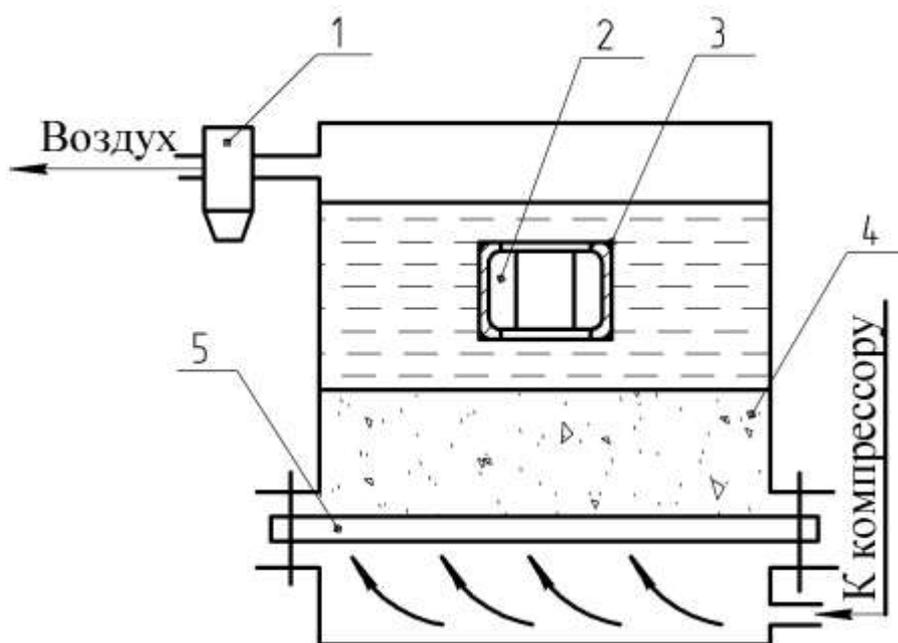


Рис. 59. Схема установки для вихревого напыления пластмассовых покрытий:  
 1 – уловитель порошка; 2 – напыляемая деталь; 3 – изоляция; 4 – камера;  
 5 – пористая перегородка

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое поверхностный слой и качество поверхностного слоя?
2. Чем вызвана неоднородность поверхностного слоя детали по глубине?
3. Назовите основные параметры качества поверхностного слоя.
4. Назовите основные параметры шероховатости поверхности.
5. Что такое упрочнение (наклеп), чем оно вызвано?
6. Назовите основные преимущества и недостатки методов ППД.
7. Что такое остаточные напряжения?
8. Какие значения остаточных напряжений являются наиболее предпочтительными с точки зрения надежности и долговечности эксплуатации машин?
9. Какими методами обработки можно добиться создания сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей?
10. В чем сущность методов нанесения электрохимических покрытий?
11. Каковы преимущества и недостатки методов нанесения электрохимических покрытий?
12. Что такое адгезия покрытия?
13. Назовите основные параметры нанесения электрохимических покрытий.
14. Что такое жизненный цикл изделия?
15. Что такое технологическая составляющая жизненного цикла изделий машиностроения?
16. Назовите основные виды разрушений и эксплуатационные свойства деталей машин.
17. Какие изменения состояния поверхностного слоя деталей происходят в процессах эксплуатации?
18. В каких состояниях может пребывать деталь?
19. Назовите технические требования к восстановленным деталям.
20. Из каких этапов состоит процесс ремонта машин?
21. Дайте определения понятиям «восстановление» и «упрочнение» деталей.
22. Из каких этапов состоит процесс восстановления деталей в процессе ремонта машин?
23. Дайте определение восстановительному производству.
24. Назовите цель и задачи восстановительного производства.
25. Назовите отличительные особенности и структура восстановительного производства.
26. Что такое ремонтная заготовка?
27. Назовите задачи и особенности механической обработки в процессах восстановления деталей
28. На какие группы классифицируются способы восстановления деталей машин?
29. Назовите преимущества и недостатки использования дополнитель-

ных ремонтных деталей.

30. Назовите назначение и дайте классификацию методов упрочнения.

31. Сущность процесса упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД).

32. Назовите статические методы ППД.

33. Назовите ударные методы ППД.

34. Сущность процессов комбинированного упрочнения.

35. Сущность деформационно-термического упрочнения.

36. Сущность процессов комбинированного упрочнения нанесением покрытий и ППД.

37. Сущность совмещенных способов ППД.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин / М. А. Балтер. – М.: Машиностроение, 1968. – 196 с.
2. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
3. Маталин А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А. А. Маталин. – М.: Машгиз, 1956. – 452 с.
4. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.: ил.
5. Овсеенко А. Н. Формирование состояния поверхностного слоя деталей машин технологическими методами / А. Н. Овсеенко, М. М. Gajek, В. И. Серебряков. – Opole: Politechnika Opolska, 2001. – 228 с.
6. Зайдес С. А. Поверхностное пластическое деформирование / С. А. Зайдес, В. А. Забродин, В. Г. Мураткин. – Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2002. – 304 с.: ил.
7. Терентьев В. Ф. Усталость металлических материалов / В. Ф. Терентьев. – М.: Наука, 2003. – 254 с.: ил.
8. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
9. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / под ред. А. М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
10. Технологические основы управления качеством машин / А. С. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.: ил.
11. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.
12. Восстановление деталей машин: справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов, В. М. Константинов; под ред. В. П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.