

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

В.Ю. Блюменштейн, М.С. Махалов, В.В. Слизников

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Рекомендовано в качестве учебного пособия
учебно-методической комиссией специальности 151001 «Технология машиностроения»

Кемерово 2011

Рецензенты:

Кречетов А.А., доцент кафедры «Технология машиностроения»

Клепцов А.А., председатель УМК специальности 151001 «Технология машиностроения»

Блюменштейн Валерий Юрьевич. Восстановление и упрочнение деталей машин : учеб. пособие [Электронный ресурс] : для студентов специальности 151001 «Технология машиностроения» / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов, В. В. Слизников. – Электрон. дан. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; зв. ; цв. ; 12 см. – Систем. требования : Pentium IV ; ОЗУ 8 Мб ; Windows 95 ; (CD-ROM-дисковод) ; мышь. – Загл. с экрана.

В учебном пособии определена роль и показаны научные подходы к проблеме технологического наследования качества поверхностного слоя и обеспечения долговечности деталей машин. Учет технологического наследования при проектировании технологии упрочняющей механической обработки предполагает раскрытие и использование функциональных связей параметров состояния поверхностного слоя с параметрами эксплуатации, что требует выполнения анализа процесса формирования этого состояния на всех стадиях жизненного цикла детали.

В учебном пособии приведены описания жизненного цикла изделий машиностроения, дана характеристика производства по восстановлению деталей и место восстановительного производства в технологии ремонта машин, рассмотрены современные методы восстановления и упрочнения деталей машин, технологии восстановления типовых деталей и методы оценки экономической эффективности упрочняющих технологий.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 151001 «Технология машиностроения» и направлению подготовки 150900 «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» при изучении дисциплин «Восстановление и упрочнение деталей машин», «Технология машиностроения» и «Научные основы технологии машиностроения», а также может быть полезно аспирантам и технологам машиностроительных предприятий.

© КузГТУ
© Блюменштейн В.Ю.
© Махалов М.С.
© Слизников В.В.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ	5
1.1. Понятие о жизненном цикле изделия	5
1.2. Что такое CALS-технологии?	5
1.3. История развития CALS-технологий	6
1.4. Жизненный цикл промышленных изделий и автоматизация его этапов в CALS-технологиях	7
1.5. Реализация функции технологической подготовки производства на основе применения методологии функционального моделирования (CALS, IDEF0)	14
1.6. Технологическая составляющая жизненного цикла изделий машиностроения	17
2. СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН	23
2.1. Основные характеристики качества поверхностного слоя деталей	23
2.2. Основные виды разрушений и эксплуатационные свойства деталей машин	29
2.3. Изменение состояния поверхностного слоя деталей в процессе эксплуатации	35
2.4. Технологическое наследование	42
3. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОИЗВОДСТВА ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ДЕТАЛЕЙ	44
3.1. Определение детали и ее состояний	44
3.2. Классификация деталей и их элементов	44
3.3. Технические требования к восстановленным деталям	47
3.4. Структура процесса восстановления деталей	47
4. ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО В ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА МАШИН	50
4.1. Ремонт машин	50
4.2. Определение понятий «восстановление» и «упрочнение» деталей	51
4.3. Восстановление деталей в процессе ремонта машин	52
4.4. Определение восстановительного производства, его цель и задачи	53
4.5. Отличительные особенности и структура восстановительного производства	54
4.6. Определение технического состояния и сортировка исходных заготовок. Виды и классификация повреждений	57
4.7. Процессы и средства для определения повреждений	57
4.8. Ремонтные заготовки. Назначение, классификация и способы создания	63
5. МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	68
5.1. Наплавка покрытий	68
5.2. Электроконтактная приварка	80
5.3. Напыление материала	82

5.4.	Задачи и особенности механической обработки в процессах восстановления деталей	87
5.4.1	Лезвийная обработка	88
5.4.2	Абразивная обработка	88
5.5.	Использование дополнительных ремонтных деталей	89
5.6.	Способы нанесения электрохимических покрытий	90
5.7.	Микродуговое оксидирование (МДО)	92
5.8.	Электроэрозионный синтез покрытий (ЭЭСП)	95
5.9.	Пластическое деформирование материала	96
5.10.	Поверхностное пластическое деформирование и его виды	98
5.11.	Алмазное выглаживание	103
5.12.	Влияние технологических факторов на профиль очага деформации	104
5.13.	Совмещенные способы ППД	105
6.	ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	109
6.1.	Корпусные детали	109
6.2.	Полые тела вращения	110
6.3.	Валы, оси	112
7.	ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ	114
7.1.	Методика расчета экономической эффективности	114
7.2.	Цех комбинированного упрочнения деталей машин деформационными и физико-химическими методами	118
7.3.	Участок МДО	121
	СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	125

1. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

1.1. Понятие о жизненном цикле изделия

Жизненный цикл изделия (Life Cycle) – совокупность этапов, через которые проходит изделие за время своего существования: маркетинговые исследования, составление технического задания, проектирование, технологическая подготовка производства, изготовление, поставка, эксплуатация, утилизация [8, 15-16].

1.2. Что такое CALS-технологии?

Современное производство сложной техники подразумевает согласованную работу многих предприятий и соответственно существует необходимость информационного взаимодействия между предприятиями и подразделениями внутри предприятий.

Для обеспечения согласованной работы всех предприятий, участвующих в проектировании, производстве, реализации и эксплуатации сложной техники, используется соответствующая информационная поддержка этапов жизненного цикла промышленных изделий.

CALS (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support) – концепция и идеология информационной поддержки жизненного цикла продукции на всех его стадиях, основанная на использовании единого информационного пространства (информационной среды), обеспечивающая единообразные способы информационного взаимодействия всех участников этого цикла: заказчиков продукции (включая государственные учреждения и ведомства), поставщиков (производителей) продукции, потребителей, эксплуатационного и ремонтного персонала, реализованная в форме международных стандартов, регламентирующих правила указанного взаимодействия преимущественно посредством электронного обмена данными.

CALS-технологии – информационные технологии описания изделий, производственной среды и процессов, протекающих в этой среде. Данные, порождаемые и преобразуемые этими информационными технологиями, представляются в виде, оговоренном CALS-стандартами, и служат для обмена или совместного использования различными участниками жизненного цикла (ЖЦ) продукции.

CALS-стандарты – набор стандартов, описывающих правила электронного представления данных об изделиях, среде и процессах и правила обмена этими данными. Часть стандартов к настоящему времени имеет статус международных. Условно они разделены на 3 основные группы:

- стандарты, описывающие общие принципы электронного обмена данными, определяющие организационно-технические аспекты электронного взаимодействия;

- стандарты, регламентирующие технологии обеспечения безопасности данных, в частности, их шифрование в процессе обмена, применение электронной цифровой подписи для подтверждения их достоверности и т.д.;

- технические стандарты, определяющие форматы и модели данных, технологии представления данных, способы доступа и использования данных, описывающих изделия, процессы и среду, в которой протекает ЖЦ изделия.

Назначение CALS-технологий – обеспечивать предоставление необходимой информации в нужное время, в нужном виде, в конкретном месте любому из участников жизненного цикла какого-либо процесса или изделия.

Основные задачи CALS-систем:

- структурирование и моделирование данных об изделиях и процессах;
- обеспечение эффективного управления и обмена данными между всеми участниками жизненного цикла изделия или процесса;
- создание и сопровождение документации, необходимой для поддержки всех этапов жизненного цикла изделий.

Эффективность управления данными подразумевает прежде всего представление информации в форме, обеспечивающей легкость ее восприятия и однозначное ее понимание всеми участниками жизненного цикла изделий. Это требование распространяется на любую документацию, используемую в разных процедурах этапов жизненного цикла.

Для успешного применения современных информационных технологий в промышленности необходимо располагать квалифицированными инженерными кадрами, знающими и умеющими использовать CALS-технологии. Во многих развитых странах CALS рассматривается как стратегия выживания в рыночной среде, позволяющая:

- расширить области деятельности предприятий (рынков сбыта) за счет кооперации с другими предприятиями, обеспечиваемой стандартизацией представления информации на разных стадиях и этапах жизненного цикла;
- повысить эффективность бизнес-процессов, выполняемых в течение жизненного цикла продукта, за счет информационной интеграции и сокращения затрат на бумажный документооборот;
- обеспечить заданное качество продукции путем электронного документирования всех выполняемых процессов и процедур;
- повысить «прозрачность» и управляемость бизнес-процессов за счет лучшей сбалансированности звеньев;
- повысить конкурентоспособность изделий и услуг;
- сократить затраты времени;
- снизить общую стоимость жизненного цикла;
- снизить затраты на поддержку эксплуатации;
- получать точную информацию в точное время;
- улучшить взаимодействия потребителя с поставщиком;
- снизить объемы незавершенного производства;
- принимать лучшие решения;
- повысить квалификацию персонала.

1.3. История развития CALS-технологий

Впервые концепция CALS возникла в середине 70-х годов в оборонном комплексе США в связи с необходимостью повышения эффективности управ-

ления и сокращения затрат на информационное взаимодействие в процессах заказа, поставок и эксплуатации средств вооружения и военной техники (ВВТ). Движущей силой явилась естественная потребность в организации «единого информационного пространства», обеспечивающего оперативный обмен данными между заказчиком – федеральными органами, производителями и потребителями ВВТ. Данная концепция изначально базировалась на идеологии «жизненного цикла» продукта и охватывала фазы производства и эксплуатации. На первоначальном этапе аббревиатура CALS расшифровывалась как **Computer Aided Logistic Support** – компьютерная поддержка поставок.

1.4. Жизненный цикл промышленных изделий и автоматизация его этапов в CALS-технологиях

В отличие от других (рис. 1.1) концепция CALS охватывает не только производство, но и все остальные этапы жизненного цикла, но не касается технологии решения прикладных задач (проектирования, планирования и т.д.).

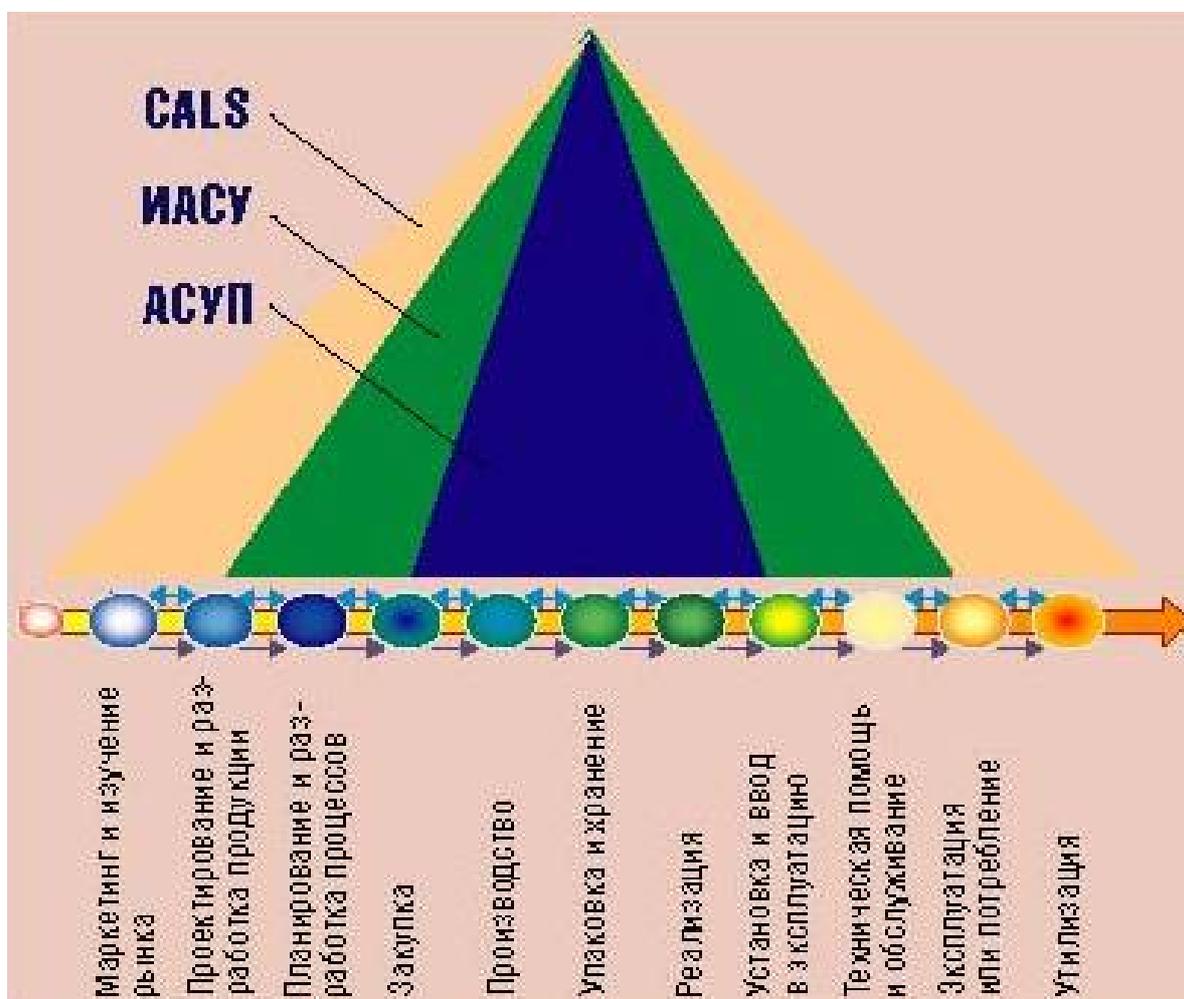


Рис. 1.1. Концепции информационной интеграции

CALS-технологии призваны служить средством, интегрирующим промышленные автоматизированные системы проектирования и управления в единую многофункциональную систему.

Основой является использование комплекса единых информационных моделей, стандартизация способов доступа к информации и ее корректной интерпретации, независимо от источников происхождения, обеспечение безопасности информации, а также юридические вопросы совместного использования информации (в том числе интеллектуальной собственности).

Информационная интеграция базируется на использовании:

- информационной модели продукта;
- информационной модели ЖЦ продукта и выполняемых в его ходе бизнес-процессов;
- информационной производственной и эксплуатационной среды.

Укрупненная классификация информационных моделей и их связь со стадиями ЖЦ продукта приведена в таблице 1.

Таблица 1

Стадии жизненного цикла продукта	Информационные модели		
	Модель продукта	Модель ЖЦ продукта и выполняемых в его ходе бизнес-процессов	Модель производственной и эксплуатационной среды
Маркетинг	Маркетинговая (концептуальная)	Модель процесса маркетинга продукта	Модель маркетинговой среды
Проектирование и разработка продукта	Конструкторская	Модель процессов проектирования, разработки	Модель проектно-конструкторской среды
Производство или предоставление услуг	Технологическая	Модель процессов производства	Модель технологической среды
Реализация	Сбытовая (цены, условия продажи и пр.)	Модель процессов продаж	Модель среды, в которой осуществляются продажи
Установка и ввод в эксплуатацию, техническая помощь и обслуживание, эксплуатация, утилизация	Эксплуатационная	Модель процессов эксплуатации	Модель эксплуатационной среды

Цель интеграции – повышение эффективности создания и использования сложной техники.

В чем выражается повышение эффективности?

1. Улучшается качество изделий за счет более полного учета имеющейся информации при проектировании и принятии управленческих решений.

Так, например, обоснованность решений, принимаемых в автоматизированной системе управления предприятием (АСУП), будет выше, если лицо, принимающее решение, и соответствующие программы АСУП имеют оперативный доступ не только к базе данных АСУП, но и к базам данных других ав-

томатизированных систем – системы автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП) и автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП) и, следовательно, могут оптимизировать планы работ, содержание заявок, распределение исполнителей, выделение финансов и т.п.

При этом под оперативным доступом необходимо понимать не просто возможность считывания данных из баз данных, но и легкость их правильной интерпретации, т.е. согласованность по синтаксису и семантике с протоколами, принятыми в АСУП. То же относится и к другим системам. Этого не так легко добиться, если основное предприятие и организации-смежники работают с разными автоматизированными системами.

2. Сокращаются материальные и временные затраты на проектирование и изготовление изделий.

Применение CALS-технологий позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описания ранее выполненных удачных разработок компонентов и устройств, многих составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю CALS-технологиями. Доступность опять же обеспечивается согласованностью форматов, способов, руководств в разных частях общей интегрированной системы.

3. Значительно снижаются затраты на эксплуатацию благодаря реализации функций интегрированной логистической поддержки.

Существенно облегчается решение проблем ремонтпригодности, интеграции продукции в различного рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации и т.п.

CALS-технология – это технология комплексной компьютеризации сфер промышленного производства, комплексность обеспечивается унификацией и стандартизацией спецификаций промышленных изделий на всех этапах их жизненного цикла. Основные спецификации представлены проектной, технологической, производственной, маркетинговой, эксплуатационной документацией.

В CALS-системах предусмотрены: хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте.

Основные элементы CALS технологии:

1. Люди. Совместная работа происходит в условиях существенно более тесного сотрудничества, чем раньше. При этом в ней могут участвовать как люди, работающие в разных подразделениях одной организации, так и сотрудники разных организаций, которые нуждаются в совместной работе и использовании распределенной в разных базах данных информации о предшествующих фазах жизненного цикла изделий.

2. Данные. Ключевой идеей концепции является «создать данные один раз, использовать много раз». Это означает, что должен быть один источник цифровых данных, к которому все должны обращаться, по мере необходимости. Часто данные находятся в разных географических точках и в различных

автоматизированных системах. Это означает, что техническая и деловая информация должна собираться из баз данных множества организаций-поставщиков, подрядчиков, субподрядчиков. Любое лицо, уполномоченное на это, может получить и использовать необходимую ему информацию, объем которой возрастает по мере продвижения к концу жизненного цикла изделия.

3. Разумное соглашение. Работа с распределенной информацией нуждается в соглашениях. Один из путей связан с созданием «Объединенной службы технической информации подрядчиков» – (CI-TTS). Это обеспечивает создание сетевых услуг, которые создают всеохватывающую, управляемую среду распределенных цифровых данных, что улучшает деловые процессы и делает ненужным бумажный документооборот.

Главная задача создания и внедрения CALS-технологий – обеспечение единообразных описания и интерпретации данных независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных.

Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартизованными. Тогда:

- становится реальной успешная работа над общим проектом разных коллективов, разделенных во времени и в пространстве;

- одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация – адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить цикл проектирования и производства;

- упрощается эксплуатация систем.

CALS-технологии не отвергают существующие автоматизированные системы проектирования и управления, а являются средством их эффективного взаимодействия.

Проблематика CALS имеет ряд аспектов, которые называют **видами обеспечения CALS:**

Лингвистическое – языки и форматы данных о промышленных изделиях и процессах, используемые для представления и обмена информацией на этапах жизненного цикла изделий.

Информационное – базы данных, в которых имеются сведения о промышленных изделиях, используемые разными системами в процессе проектирования, производства, эксплуатации и утилизации продукции. В состав информационного обеспечения входят также серии международных и национальных CALS-стандартов и спецификаций.

Программное – программные комплексы, предназначенные для поддержки единого информационного пространства этапов жизненного цикла изделий. Это прежде всего системы управления документами и документооборотом, управления проектными данными, взаимодействия предприятий, подготовки интерактивных электронных технических руководств и некоторые другие.

Математическое – методы и алгоритмы создания и использования моделей взаимодействия различных систем. В первую очередь – это методы имита-

ционного моделирования сложных систем, методы планирования процессов и распределения ресурсов.

Методическое – методики выполнения таких процессов, как параллельное (совмещенное) проектирование и производство, структурирование сложных объектов, их функциональное и информационное моделирование, объектно-ориентированное проектирование, создание онтологии приложений.

Техническое – аппаратные средства получения, хранения, обработки и визуализации данных при информационном сопровождении изделий.

Организационное – различного рода документы, соглашения и инструкции, регламентирующие роли и обязанности участников жизненного цикла промышленных изделий.

Системы, поддерживающие основные этапы жизненного цикла промышленных изделий, представлены на рис. 1.2 [8, 15-16]:

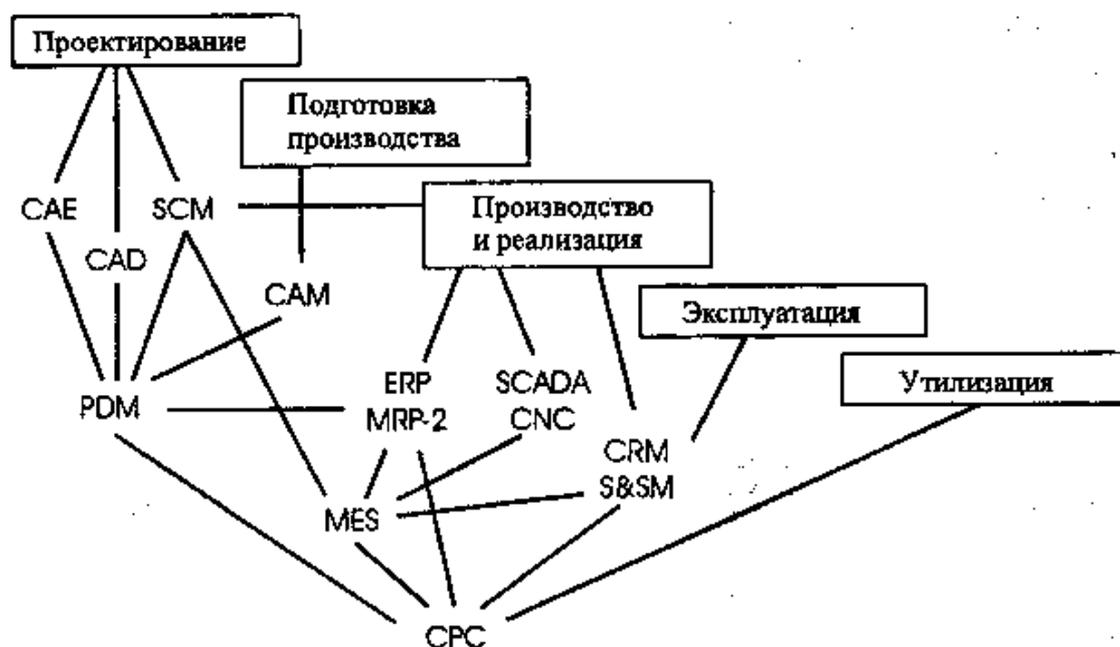


Рис. 1.2. Системы поддержки основных этапов жизненного цикла

- CAE – Computer Aided Engineering (автоматизированные расчеты и анализ);
- CAD – Computer Aided Design (автоматизированное проектирование);
- CAM -Computer Aided Manufacturing (автоматизированная технологическая подготовка производства);
- PDM – Product Data Management (управление проектными данными);
- ERP – Enterprise Resource Planning (планирование и управление предприятием);
- MRP-2 – Manufacturing (Material) Requirement Planning (планирование производства);
- MES – Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система);
- SCM – Supply Chain Management (управление цепочками поставок);
- CRM – Customer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками);

- SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами);
- CNC – Computer Numerical Control (компьютерное числовое управление);
- S&SM- Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием);
- CPC – Collaborative Product Commerce (совместный электронный бизнес).

Ниже дана краткая характеристика, приведенных на рис. 1.2 этапов и соответствующих систем автоматизации.

Современные САПР (или системы CAE/CAD) – обеспечивают сквозное проектирование сложных изделий, выполняют большинство проектных процедур и имеют многомодульную структуру.

Модули различаются ориентацией на те или иные проектные задачи применительно к тем или иным типам устройств и конструкций.

При этом возникают проблемы, связанные с построением общих баз данных с выбором протоколов, форматов данных и организацией совместного использования этих модулей. Особенно много этих проблем на предприятиях, производящих сложные изделия, в частности с механическими и радиоэлектронными подсистемами, поскольку САПР машиностроения и радиоэлектроники до недавнего времени развивались отдельно и самостоятельно.

Системы PDM – разрабатываются для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения. Они либо входят в состав модулей конкретной САПР, либо имеют самостоятельное значение и могут работать совместно с разными САПР.

Система SCM, иногда называемой системой управления поставками комплектующих (Component Supplier Management) – на этапе производства обеспечивает поставки необходимых материалов и комплектующих, однако ее услуги требуются уже на этапе проектирования.

АСТПП, составляющие основу системы САМ, выполняют:

- синтез технологических процессов и программ для оборудования с ЧПУ;
- выбор технологического оборудования, инструмента, оснастки, расчет норм времени.

Модули системы САМ обычно входят в состав развитых САПР, и поэтому интегрированные САПР часто называют системами CAE/CAD/CAM/PDM.

Функции управления на предприятиях выполняются автоматизированными системами на нескольких иерархических уровнях.

АСУП, классифицируемые как системы ERP или MRP-2, осуществляют автоматизацию управления на верхних уровнях от корпорации (производственных объединений предприятий) до цеха.

Наиболее развитые системы ERP выполняют различные бизнес-функции: планирование производства, закупки, сбыт, анализ и управление финансами, персоналом, складским хозяйством, учетом основных фондов и т.п.

Системы MRP-2 выполняют бизнес-функции, непосредственно связанные с производством.

Системы MES ориентированы на решение оперативных задач управле-

ния проектированием, производством и маркетингом.

Систему SCADA вводят в состав АСУТП для выполнения диспетчерских функций: сбора и обработки данных о состоянии технологического оборудования и протекании технологических процессов, а также для разработки программного обеспечения для встроенного оборудования.

Системы CNC на базе контроллеров, встроенных в технологическое оборудование, используют для непосредственного программного управления технологическим оборудованием.

С помощью системы CRM на этапе реализации продукции выполняются функции управления отношениями с заказчиками и покупателями, проводится анализ рынка, определяются перспективы спроса на планируемые к выпуску изделия

Система S&SM служит для решения проблем обслуживания и выполняет маркетинговые функции.

На этапе эксплуатации применяются специализированные компьютерные системы, занятые вопросами ремонта, контроля, диагностики эксплуатируемых систем. Обслуживающий персонал использует интерактивные учебные пособия и технические руководства, а также средства для дистанционного консультирования при поиске неисправностей, программы для автоматизированного заказа деталей взамен отказавших.

Перечисленные автоматизированные системы могут работать автономно, и в настоящее время так обычно и происходит. Однако эффективность автоматизации выше, если данные, генерируемые в одной из систем, будут доступны в других системах, поскольку принимаемые в них решения станут более обоснованными.

Чтобы достичь должного уровня взаимодействия промышленных автоматизированных систем, требуется создание **единого информационного пространства** не только на отдельных предприятиях, но и в рамках объединения предприятий. ЕИП выступает как единый источник данных для всех участников ЖЦ изделия. ЕИП обеспечивается благодаря унификации, как формы, так и содержания информации о конкретных изделиях на различных этапах их жизненного цикла.

Унификация формы достигается использованием стандартных форматов и языков представления информации в межпрограммных обменах и при документировании.

Унификация содержания – однозначная правильная интерпретация данных о конкретном изделии на всех этапах его жизненного цикла.

Указанная унификация является основой для единого электронного описания изделия в CALS-пространстве.

Стратегия CALS предусматривает два этапа разработки ЕИП:

- автоматизацию отдельных процессов ЖЦ изделия и представление данных о них в электронном виде согласно международным стандартам;
- интеграцию автоматизированных процессов и относящихся к ним данных в составе ЕИП.

1.5. Реализация функции технологической подготовки производства на основе применения методологии функционального моделирования (CALS, IDEF0)

Технологическое проектирование объединяет две функции технологической подготовки производства: разработку технологического процесса (ТП) и проектирование средств технологического оснащения (СТО).

При разработке ТП к наиболее часто решаемым задачам относят:

- 1) проектирование единичных ТП изготовления деталей и их сборки на основе процессов-аналогов;
- 2) разработку единичных ТП изготовления деталей и их сборки – индивидуальное проектирование;
- 3) создание управляющих программ для оборудования с ЧПУ.

Каждая из указанных задач является самостоятельной, вместе с тем 3-ю задачу можно рассматривать как этап проектирования операционной технологии.

Функциональное моделирование ТП (бизнес-процессов – БП) – методология и программный инструментарий анализа ТП, позволяющий представить все множество ТП предприятия в виде набора диаграмм, отображающих все функции, выполняемые в ходе ТП, а также связывающие их материальные и информационные потоки и необходимые ресурсы [9].

Наиболее распространенная методология функционального моделирования – SADT (Structural Analysis and Design Technology) и ее реализация (США) – IDEF0 (Integrated DEFinition).

В общем случае **проектирование технологического процесса** – это целенаправленная последовательность действий по принятию и реализации проектных решений, приводящих к составлению на технологическом языке описания процесса механической обработки детали или сборки.

Процесс проектирования состоит из взаимосвязанных задач анализа и синтеза.

При решении задачи анализа осуществляется построение структурной модели процесса проектирования, при решении задачи синтеза – структурное проектирование ТП.

Сущность структуризации процесса проектирования состоит в представлении его в виде иерархической системы, уровни которой отражают этапы проектирования. На каждом этапе (уровне) выделяются проектно-технологические задачи.

ТП разрабатывают на основе предварительно составленного межцехового технологического маршрута (расцеховки). Расцеховка определяет поэтапное движение деталей, сборочных единиц и самого изделия в процессе их изготовления.

Процессами-аналогами принято называть типовые и групповые ТП.

Единичный ТП можно проектировать на основе процессов-аналогов. В этом случае его структура и содержание технологических операций в значительной мере определяются структурой процесса-аналога. Разработку единичных ТП изготовления деталей на основе процессов-аналогов выполняют в соот-

ветствии со структурной диаграммой, приведенной на рис. 1.3.

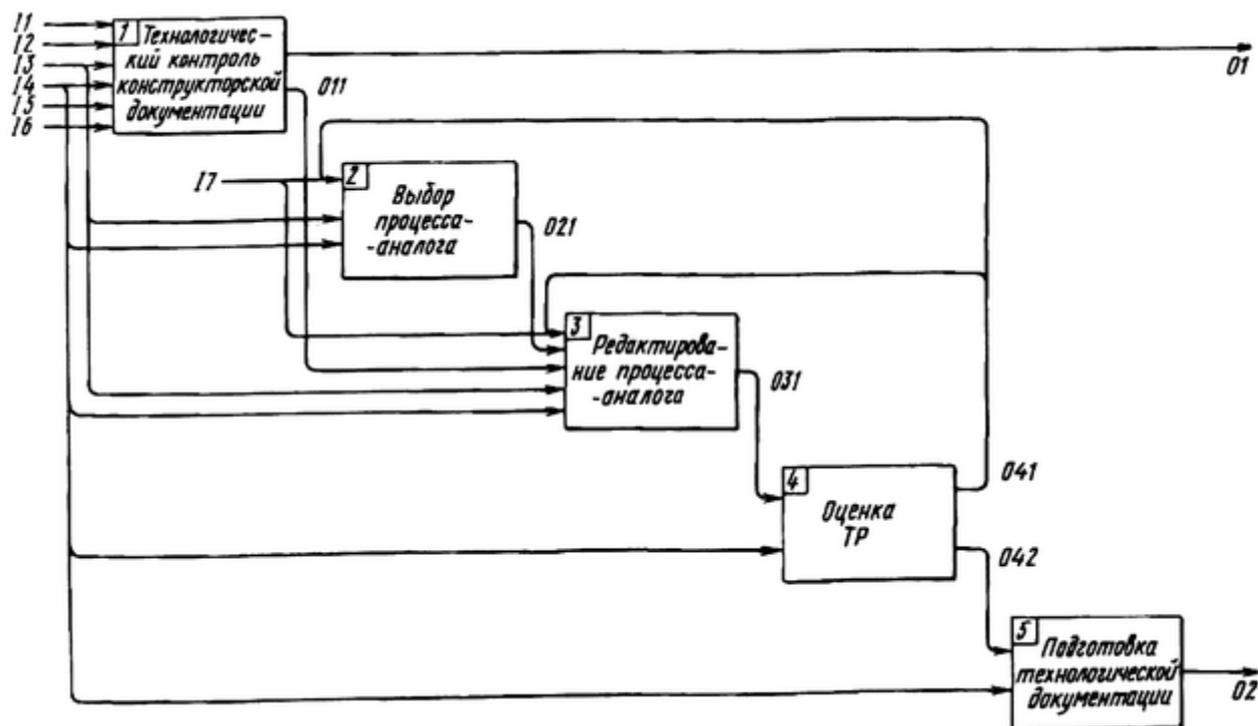


Рис. 1.3. Структурная диаграмма разработки единичного ТП изготовления деталей на основе процесса-аналога: I1 – конструкторская документация на изделие; I2 – директивная документация на заготовку; I3 – программа выпуска изделия; I4 – информационное обеспечение; I5 – чертежи изделий, отработанных на технологичность; I6 – чертеж заготовки (разработанный); I7 – изменения ТП изготовления деталей; O1 – изменения конструкции деталей; O11 – конструкторская документация, прошедшая технологический контроль; O21 – параметры процесса-аналога; O31 – параметры маршрутной и операционной технологий; O41 – изменения ТП; O42 – параметры маршрутной и операционной технологий; O2 – ТП изготовления детали; ТР – технологические решения

Важнейшим этапом решения является выбор процесса-аналога, при котором последовательно решаются 2 частные задачи:

1. Классификация детали. Для ее решения информационное обеспечение должно включать развитый конструкторско-технологический классификатор.
2. Выбор процесса-аналога по ее классификационному коду.

Сформированный код изделия является основой для выбора процесса-аналога. Сведения о процессах-аналогах входят в состав информационного обеспечения. Проводят сравнение кодов изделия, на которое разрабатывают ТП, и изделий-представителей, данные о ТП изготовления которых имеются в информационном обеспечении. В случае нахождения процесса-аналога его параметры (см. рис. 1.3, стрелку O21 принимают за основу создаваемого единичного процесса.

Собственно разработка единичного ТП сводится к редактированию про-

цесса-аналога в соответствии с конструктивно-технологическими особенностями детали, для которой этот процесс и разрабатывают. При этом может измениться как структура процесса-аналога (вследствие включения в него или, наоборот, удаления некоторых операций), так и содержание самих технологических операций. Возможно проведение необходимых технологических расчетов по определению режимов обработки, нормированию операций и т.д.

ТР, принятые в процессе проектирования и представленные параметрами маршрутной и операционной технологии, оценивают, используя различные количественные (технико-экономические) и качественные критерии. Если параметры спроектированной маршрутной и (или) операционной технологии не отвечают поставленным критериям (стрелка О41), то принимают решение об изменении ТП. В зависимости от степени несоответствия параметров ТП поставленным критериям необходимые изменения вносят либо на этапе редактирования, либо на этапе выбора процесса-аналога. В последнем случае возможна корректировка конструкторско-технологического кода детали и поиск нового процесса-аналога с выполнением всех последующих этапов разработки.

Изменения вносят итерационно до тех пор, пока параметры проектируемого процесса не будут удовлетворять поставленным критериям.

Параметры разработанного ТП представляют в технологической документации в формах, установленных стандартами ЕСТД.

Единичные ТП изготовления деталей при индивидуальном проектировании разрабатывают в соответствии со структурной диаграммой, показанной на рис. 1.4.

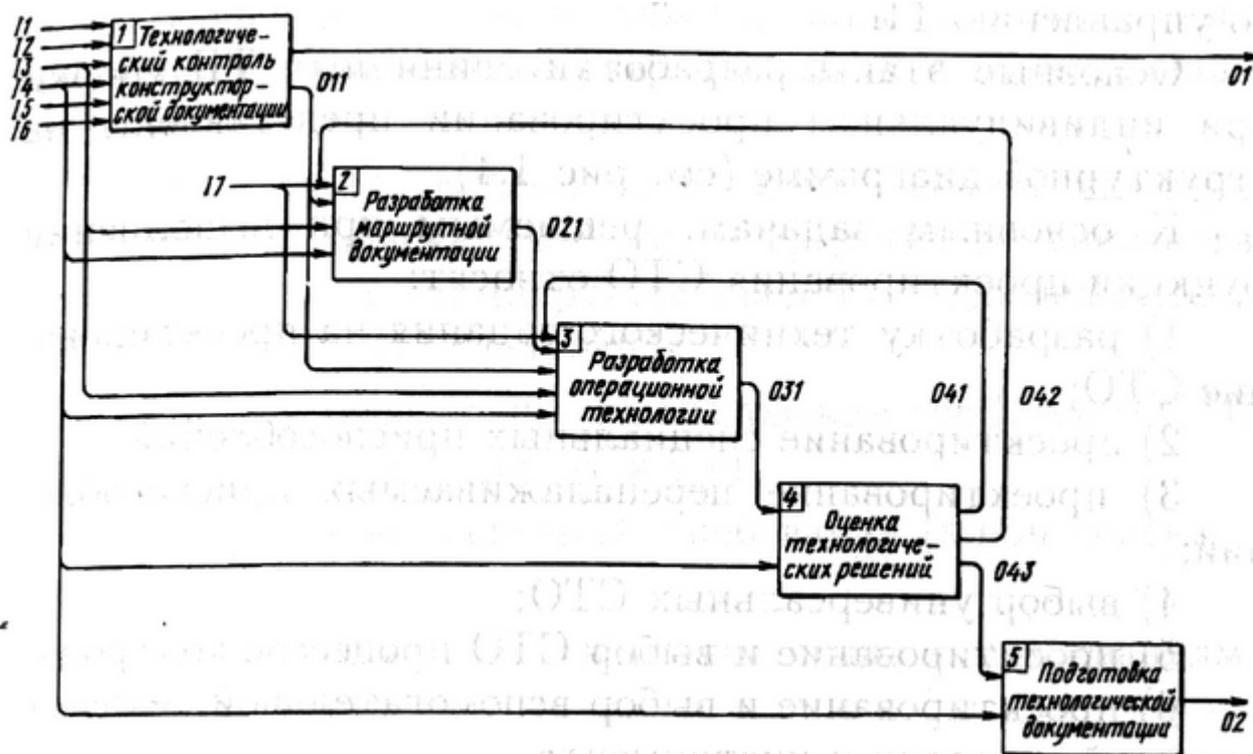


Рис. 1.4. Структурная диаграмма разработки единичного ТП изготовления деталей и сборки при индивидуальном проектировании: I1 – конструкторская документация на изделие; I2 – конструкторская документация на директивную за-

готовку; I3 – программа выпуска изделий; I4 – информационное обеспечение; I5 – чертежи изделий, отработанных на технологичность; I6 – чертеж заготовки (разработанный); I7 – изменения ТП изготовления деталей; O1 – изменения конструкций деталей; O11 – конструкторская документация, прошедшая технологический контроль; O21 – параметры маршрутной технологии; O31 – параметры маршрутной и операционной технологий; O41 – изменения маршрутного ТП; O42 – изменения операционной технологии; O43 – параметры маршрутной и операционной технологий; O2 – ТП изготовления детали

1.6. Технологическая составляющая жизненного цикла изделий машиностроения

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. 1.5. Она включает в себя производство заготовок, изготовление деталей, сборку и испытание готовых изделий.

Жизненный цикл машиностроительного изделия схематично представлен на рис. 1.6.

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 утили-

зация. По достижении изделием своего морального или физического старения, а лучше, если они совпадают, проводится полная утилизация изделия, и оно прекращает свою «жизнь».

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.

Основными функциями ТПП являются:

- 1) обеспечение технологичности конструкций изделий;
- 2) разработка технологических процессов;
- 3) проектирование средств технологического оснащения;
- 4) контроль и управление технологическим процессом.

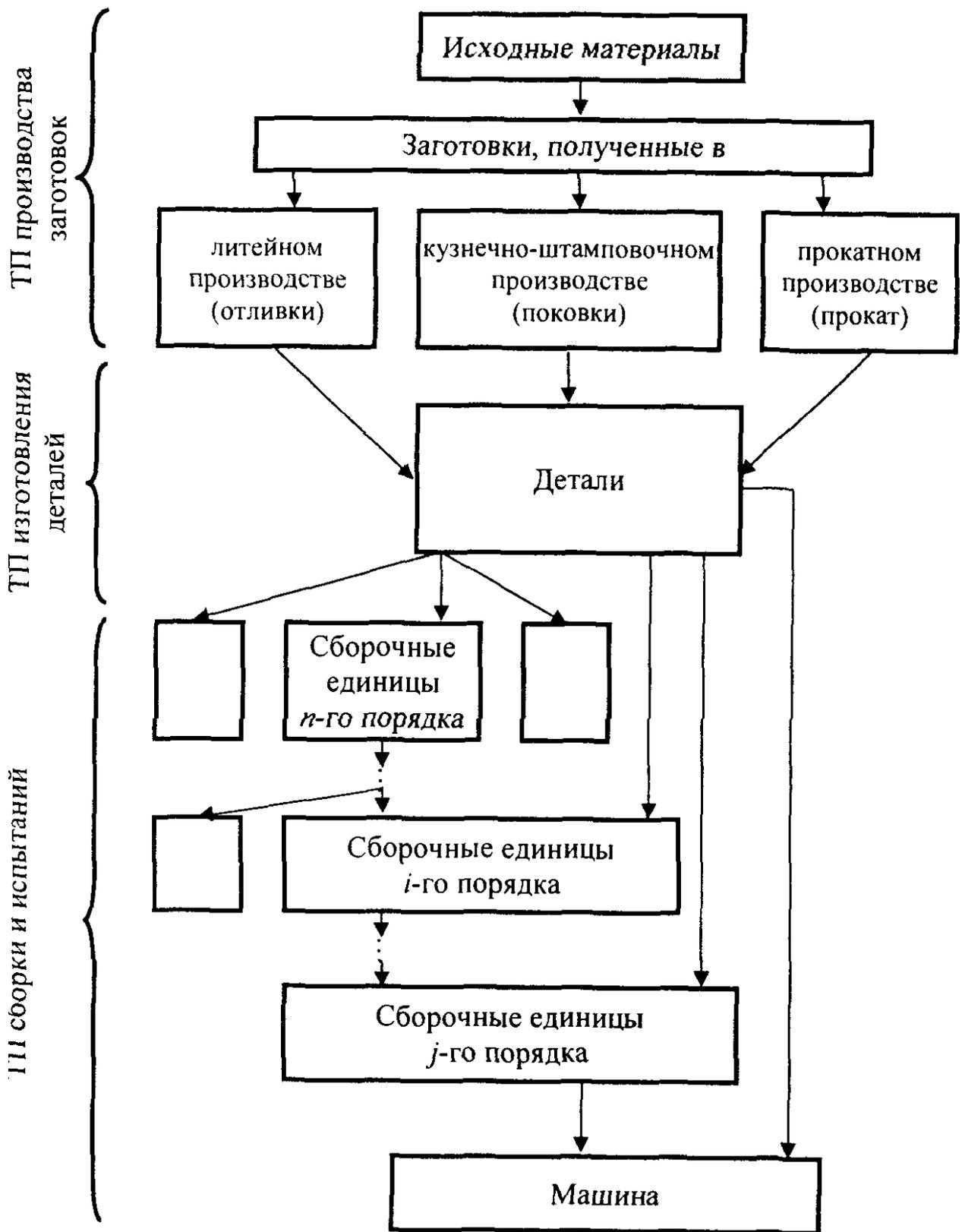


Рис. 1.5. Технологическая структура машиностроительных изделий:
 ТП – технологическая подготовка

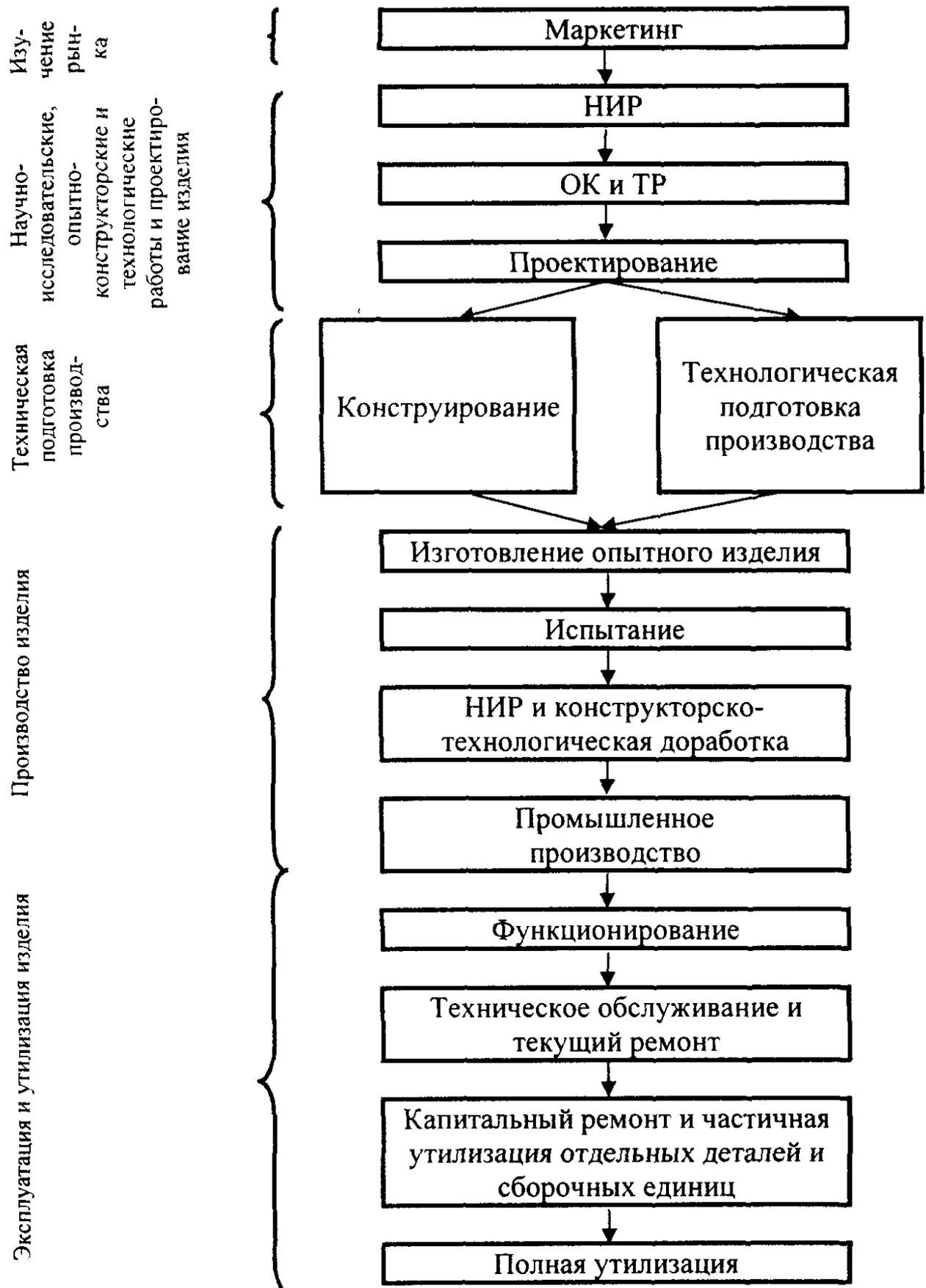


Рис. 1.6. ЖЦ машиностроительных изделий

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.

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.

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.

ТП классифицируются на единичный, типовой и групповой.

Единичный ТП разрабатывается индивидуально на конкретное изделие.

Типовой ТП создают для группы изделий обладающих общими конструктивными и технологическими признаками.

Групповой ТП – это технологический процесс изготовления группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

В последние годы активно создаются **модульные ТП**, которые базируются на единстве технологических методов обработки элементарных поверхностей (модулей) различных деталей.

Степень детализации описания ТП определяется серийностью производства и экономическими соображениями.

В единичном производстве осуществляется маршрутное описание ТП, которое заключается в сокращенном описании всех технологических операций в последовательности их выполнения без указания переходов и технологических режимов.

В мелкосерийном и серийном производствах, а для ответственных изделий и в единичном производстве осуществляется маршрутно-операционное описание ТП, при котором даются сокращенное описание технологических операций в маршрутной карте и полное описание ответственных операций, формирующих качество изделий.

В серийном, крупносерийном и массовом производствах, а для ответственных изделий и в мелкосерийном производстве осуществляется операционное описание ТП, которое сводится к полному описанию всех технологических операций в последовательности их выполнения с указанием переходов и технологических режимов. При трудоемком операционном описании ТП гарантируется качество изделий. Значительна его роль и при эксплуатации и утилизации изделий, особенно при текущем и капитальном ремонтах. Технологическая подготовка занимает более 50% времени всей технической подготовки производства, и в условиях жесткой конкуренции, когда время на подготовку производства исчисляется днями и неделями, а не годами, необходимым является использование новейшей вычислительной техники и программ.

Технологическая составляющая в жизненном цикле изделия является основной и в его производстве, где реализуются разработанные ТП, производятся их корректировка, совершенствование и контроль.

Это говорит о целесообразности объединения технологических аспектов всех этапов жизненного цикла изделия в единый процесс.

2. СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

2.1. 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 остаточные напряжения [2-5].

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.

Одна из этих схем показана на рис. 2.1 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 состава 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.

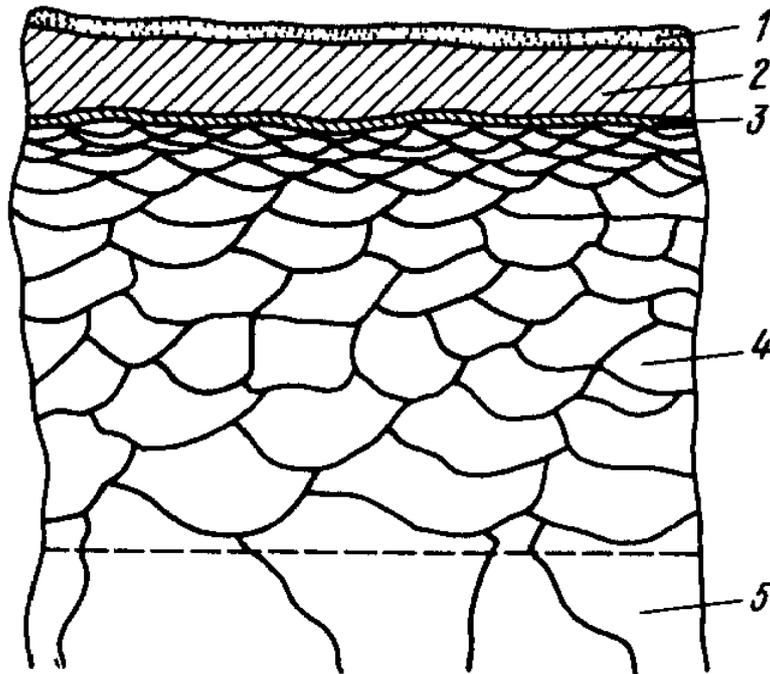


Рис. 2.1. Схема поверхностного слоя детали

1. Геометрические параметры отклонения реальной поверхности оцениваются макрогеометрическими (отклонения от правильной геометрической формы и волнистость) и микрогеометрическими (шероховатость и регулярные микрорельефы) параметрами.

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. 2.2). 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.

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 (шероховатость поверхности) характеризуются малым отношением их шага (L_3) к высоте (h_3) в пределах $L_3/h_3 < 50$.

Различают поперечную и продольную шероховатости (рис. 2.3). Первая характеризуется микронеровностями в направлении движения подачи АС, вторая—в направлении главного движения АВ. На рис. 2.3 шаг волн обозначен L_2 , шаг поперечных микронеровностей – L_3 и шаг продольных микронеровностей – L_3' .

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 параметров:

- средним арифметическим отклонением профиля – Ra , мкм;
- высотой неровностей профиля по десяти точкам Rz , мкм;
- наибольшей высотой неровностей профиля R_{max} , 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. Сусловым, Ю.Г. Шнейдером и рядом других исследователей [2,4-5,11].

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.

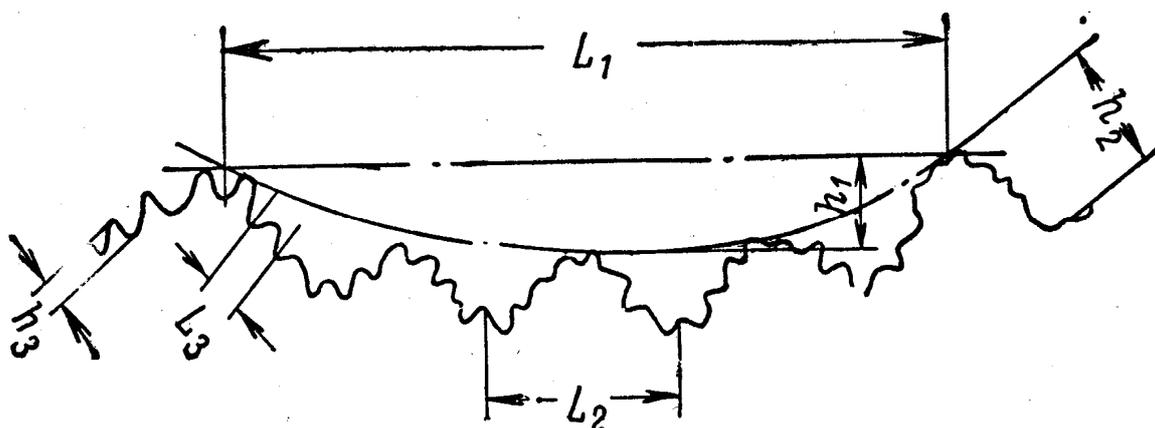


Рис. 2.2. Макро- и микрогеометрические отклонения

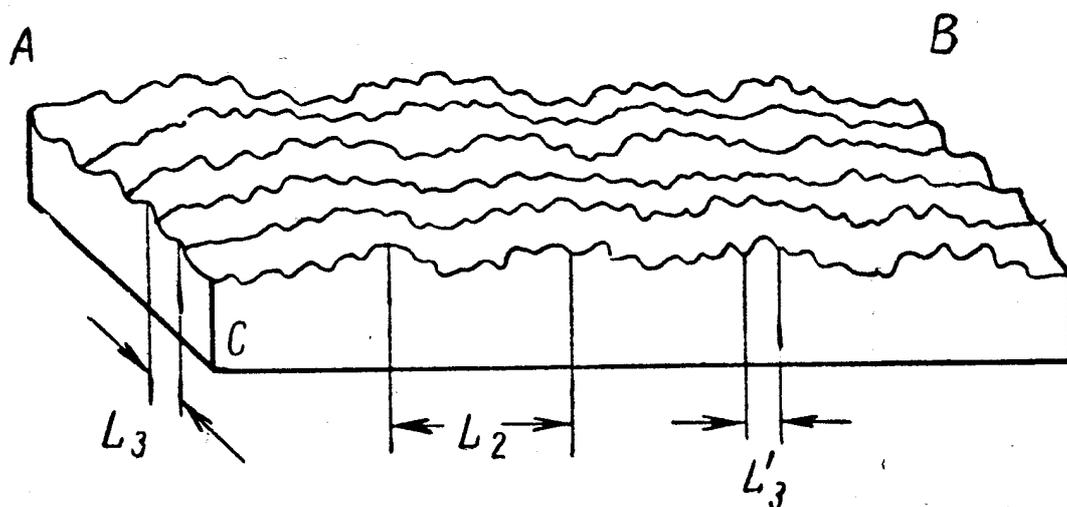


Рис. 2.3. Поперечная и продольная шероховатости

2. Физическое состояние поверхностного слоя деталей в технологии механической обработки наиболее часто характеризуется 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_3 , мкм;
- форма и распределение зерен;
- ориентация решетки монокристаллического материала;

- текстура поликристаллического материала;
- плотность дислокаций – ρ_d , см³;
- концентрация вакансий – C_v ;
- размер (форма) блоков – l_b , нм,
- угол разориентировки блоков – α_b , (град),
- размер областей когерентного рассеяния – $\langle D \rangle$, нм;
- среднее квадратическое смещение атомов, вызванное статическими искажениями решетки – $\langle u^2_\tau \rangle$, нм²;
- среднее квадратическое смещение атомов, вызванное их тепловыми колебаниями $\langle u^2 \rangle$, нм²;

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); α, β, γ , 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_ϕ , %.

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 позволяет 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 сопровождает механическую обработку, 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 σ_{T0} . Угол наклона упругого участка α 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 β . 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.

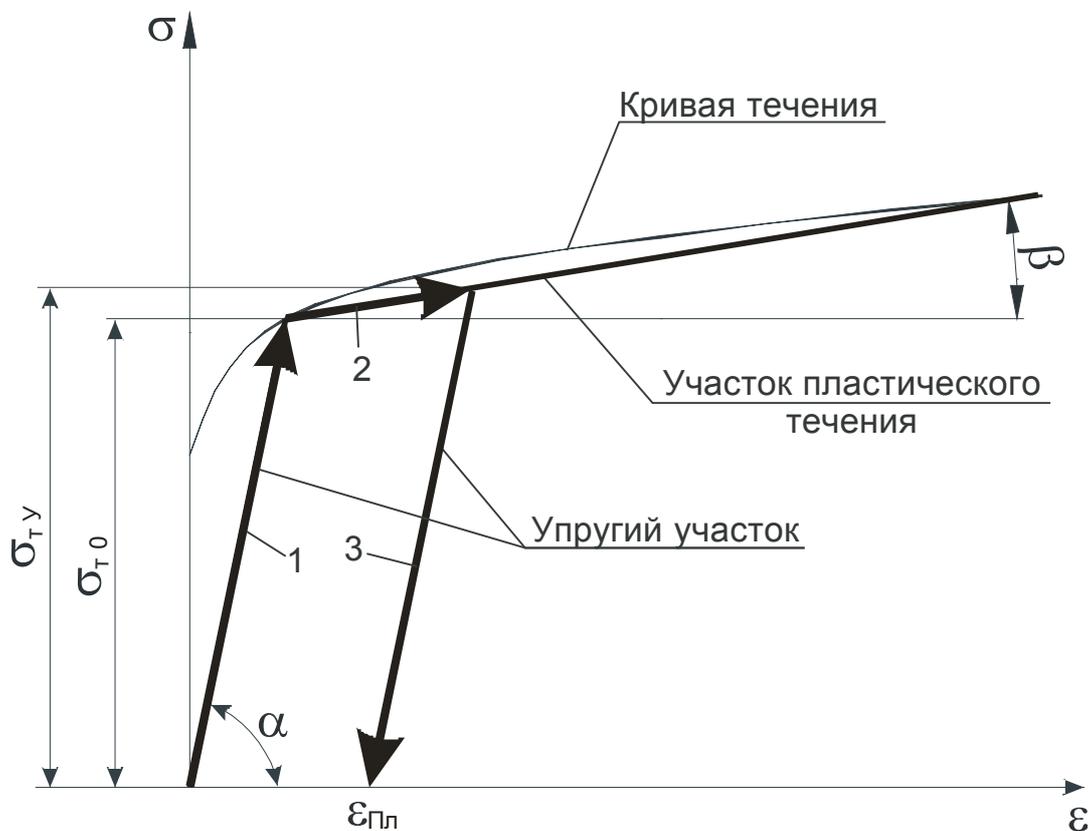


Рис. 2.4. Кривая течения металла (билинейная аппроксимация)

Повторное нагружение упрочненной детали происходит уже вдоль участка 3 в направлении, обратном указанному стрелкой на рис. 2.4. При этом, напряжения предела текучести металла возрастают до уровня $\sigma_{ТУ}$.

Параметрами упрочнения (наклепа) при обработке поверхностным пластическим деформированием являются:

- глубина наклепа – h , мкм;
- степень наклепа – δ , %;
- градиент наклепа – u_{δ} , МПа/мм.

Важной характеристикой механического состояния ПС являются **остаточные напряжения (ОН)**. Это упругие напряжения, которые остались в детали после обработки. В зависимости от объемов тела, в которых рассчитываются ОН, последние условно подразделяются на напряжения:

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

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

Приведенная классификация характеристик состояния ПС базируется, в основном, на классических параметрах микрогеометрии, физики и химии металлов. Она не содержит и не отражает в неявной форме ряд дефектов ПС, которые часто встречаются в производственных условиях и создают большие трудности при изготовлении деталей ответственного назначения. Так в ряде случаев при полировании на поверхности образуется слой с аморфной стекловидной структурой (слой Бейльби). Толщина его соизмерима с размерами зерен полирующего абразивного материала (обычно 1...15 мкм). Причиной его образования могут служить мгновенные «вспышки» температур и временные термические напряжения, возникающие при периодическом контакте зерен абразива с обрабатываемой поверхностью. Металл ПС как бы расплавляется, а затем, не успев кристаллизироваться, быстро застывает в стекловидном состоянии. Слой Бейльби термодинамически неустойчив и кристаллизуется при подогреве до $(0,4...0,6)T_{пл}$ (температуры плавления).

2.2. 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 пере-**

менными (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)** [7, 10].

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. 2.5) [7, 10].

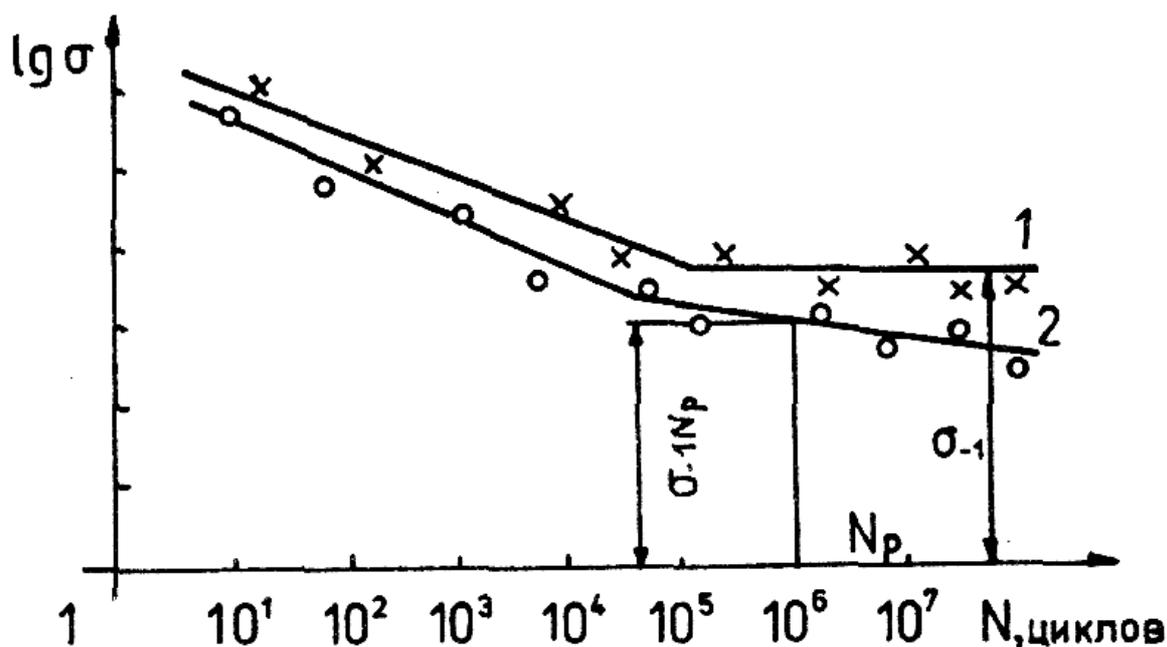


Рис. 2.5. Кривые многоциклового усталости: 1 – с пределом выносливости; 2 – с ограниченным пределом выносливости;

В зависимости от особенностей материала, температуры испытаний и физико-химической активности среды кривые усталости могут иметь либо асимптотический характер (рис. 2.4, кривая 1) либо непрерывно снижающийся (кривая 2). Величина амплитуд напряжений σ , являющихся асимптотами кривых усталости 1-го типа – это предел выносливости материала, а величину амплитуд напряжений (σ , 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 [7, 10].

В зависимости от свойств материала и характера приложения нагрузки изломы в месте разрушения детали могут быть **вязкими и хрупкими**.

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, касательные 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.

Наиболее характерные явления при изнашивании:

1. Возникновение высоких локальных температур на участках микроконтактов, достигающих температуры плавления металла, и образование "мостиков сварки". Многократное воздействие механических и термических напряжений может вызвать появление микротрещин; соединение их на некоторой глубине может привести к отслоению металла ПС.
2. Химико-термические процессы в ПС.
3. Влияние смазки. Кроме положительного эффекта смазка может оказывать расклинивающее действие в микротрещинах и способствовать разрушению ПС.
4. Перенос материала с одной поверхности на другую. При изнашивании происходит постоянное возникновение и разрушение фрикционных связей в результате молекулярно-механического взаимодействия поверхностей.

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**

ние 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.

Изнашивание в условиях избирательного переноса характеризуется такими атомарными явлениями в зоне контакта, которые формируют практически безизносные 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°C . Частицы воды, присутствующие в воздухе, являются электролитом, т.к. 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°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 ~25 мкм. 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:

- пониженная коррозионная стойкость границ зерен в результате тления из пересыщенного раствора фазы с отрицательным потенциалом);
- наличие в сплаве структурной составляющей, неустойчивой по отношению к данной среде;
- насыщение водородом границ зерен, сопровождающееся развитием больших напряжений, что приводит к уменьшению межкристаллитной прочности.

Фреттинг-коррозия (коррозия при трении) возникает при относительном колебательном (несколько микрометров) 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 (т.н. 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 большой скоростью и захлопываются, создавая своего рода микрогидравлические удары. Многократно повторяющиеся удары приводят к разрушению поверхности детали (т.н. кавитационная эрозия), образованию каверн.

Условия работы деталей машин отличаются большим многообразием по характеру действующих нагрузок, температурам, окружающей среде, воздейст-

вию магнитных, электрических полей, радиационному облучению и т.п. Поэтому для конкретных условий работы и деталей конструктор устанавливает необходимые требования к физико-химическим, механическим, технологическим свойствам материала деталей и показатели их эксплуатационных свойств.

К основным характеристикам эксплуатационных свойств деталей машин относятся:

1. износостойкость в условиях: а) сухого трения; б) граничного трения; в) жидкостного трения; г) избирательного трения; д) гидроабразивного и газоабразивного износа.
2. Сопротивление усталости при нормальной и высокой температуре, в атмосферной и агрессивной среде, при малоцикловом и многоцикловом нагружении, при симметричном и асимметричном цикле, термоусталость.
3. Коррозионная стойкость в условиях: а) атмосферной коррозии; б) электрохимической коррозии; в) газовой коррозии; г) фреттинг-коррозии.
4. Стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением.
5. Эрозионная стойкость.
6. Кавитационная стойкость.
7. Прочность сопряжений.
8. Прочность сцепления покрытий.
9. Контактная жесткость.
10. Длительная прочность.
11. Жаростойкость.
12. Радиационная стойкость.
13. Виброустойчивость.
14. Плотность соединений.
15. Обтекаемость газами и жидкостями.
16. Отражательная способность.
17. Эмиссия электронов (работа выхода электронов).

2.3. Изменение состояния поверхностного слоя деталей в процессе эксплуатации

Трение и изнашивание деталей в значительной степени определяется формой и высотой шероховатости, а также направлением штрихов обработки.

Тонкие и многочисленные неровности обеспечивают большую износостойкость, чем неровности той же высоты, но большого шага.

При жидкостном трении и малой высоте неровностей направление следов обработки значения не имеет. По мере увеличения шероховатости более выгодным является совпадение направления следов на обработанной поверхности и движения детали.

Высота неровностей и направление штрихов на обработанной поверхности влияет на величину коэффициента трения-скольжения. Наименьшее значение коэффициента трения наблюдается при перпендикулярном направлении штрихов трущихся поверхностей или при их беспорядочном расположении, как это имеет место после суперфиниширования.

На рис. 2.6 приведены кривые изменения величины коэффициента трения в зависимости от суммарной шероховатости трущихся поверхностей, которые отражают явление схватывания при трении поверхностей с низкой шероховатостью, а также механическое зацепление и срез неровностей грубо обработанных поверхностей. Как видим, поверхность с меньшей шероховатостью не всегда имеет меньший коэффициент трения, чем поверхность более грубо обработанная.

При малой шероховатости контакт двух твердых тел приводит к молекулярному сцеплению поверхностей и увеличению коэффициента трения, а значит и износа. Увеличение шероховатости может привести к тому, что даже при сравнительно небольшой нагрузке произойдет прорыв масляной пленки и переход к сухому трению, сопровождающемуся интенсивным изнашиванием.

Деформационное упрочнение (наклеп) увеличивает твердость ПС, в результате чего уменьшаются взаимное внедрение и деформации микровыступов трущихся поверхностей.

Упрочнение препятствует развитию пластических деформаций ПС трущихся деталей, при которых может происходить их холодная сварка (адгезия или схватывание), приводящая к наиболее интенсивному изнашиванию.

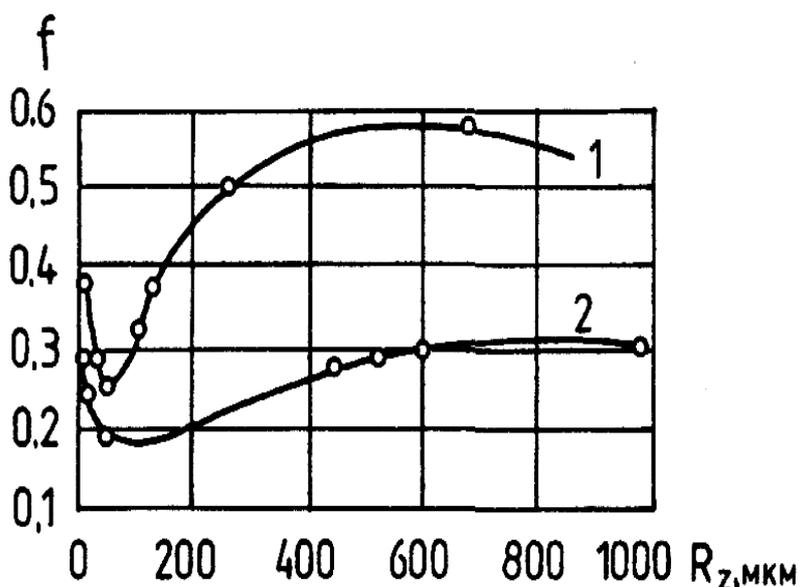


Рис. 2.6. Зависимость коэффициента трения f от суммарной шероховатости R_z трущихся тел: 1 – чугун по стали; 2 – бронза по стали

При перенаклепе металла его износостойкость снижается, т.к. перенаклеп приводит к исчерпанию пластических свойств и микродефектам в виде нарушения сплошности металла. Зависимость износостойкости от глубины h и степени наклепа δ ПС имеет экстремальный характер.

Существенное влияние на триботехнические (трение и износ) характеристики трущихся деталей оказывает физико-химическое состояние ПС (его фазовый и химический состав). Поэтому для повышения эксплуатационных свойств деталей, в частности для улучшения их триботехнических характеристик, широко используются химико-термическая обработка, поверхностное ле-

гирование, обработка лучом лазера и другие методы формирования рационального структурно-фазового состояния ПС.

Технологические остаточные напряжения в тонком ПС не оказывают заметного влияния на изнашивание трущихся пар, однако если большие остаточные напряжения распространяются в ПС на значительную глубину (более 0,5 мм), то остаточные напряжения растяжения несколько увеличивают износ, а напряжения сжатия его уменьшают. Но по сравнению с шероховатостью остаточные напряжения оказывают на износ более слабое влияние.

Состояния ПС: степень и глубина упрочнения, остаточные напряжения сильно влияют на усталостную прочность деталей.

Дефекты и неровности на поверхности детали, работающей в условиях циклической и знакопеременной нагрузки, вызывают концентрацию напряжений, играют роль очагов субмикроскопических нарушений сплошности металла ПС и его разрыхления, первопричиной зарождения усталостных трещин.

Влияние шероховатости ПС на сопротивление усталости можно оценить коэффициентом концентрации напряжений. Если обработанную поверхность детали представить, как поверхность с большим количеством повторяющихся мелких рисок, то для расчета теоретического коэффициента концентрации напряжений может быть использована формула Г. Нейбера:

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \kappa \sqrt{\gamma_1 \times \frac{Rz}{r'}}, \quad (1)$$

где: $\kappa = 1$ при кручении и сдвиге, $\kappa = 2$ при растяжении и изгибе; Rz – высота микронеровностей; r' – радиус кривизны на дне впадины; γ_1 – коэффициент разгрузки, зависящий от отношения шага неровностей к их высоте (рис. 2.7).

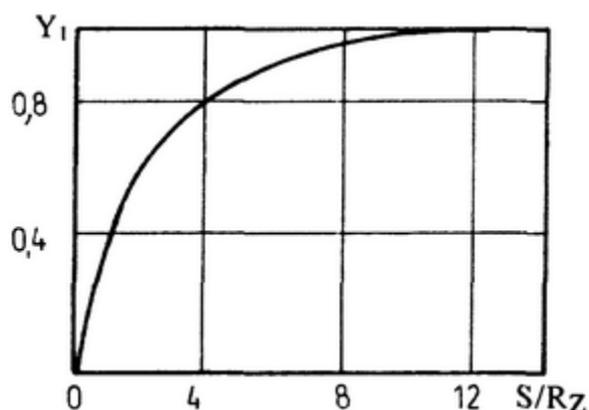


Рис. 2.7. Зависимость коэффициента разгрузки от отношения S/Rz

После лезвийной обработки можно принять $\alpha_{\sigma} = 1,55 \dots 2,4$. После шлифования с $Ra = 0,32; 0,63$ и $1,25$ мкм соответственно $1,2; 1,24$ и $1,48$. Пределы выносливости образцов без концентраторов σ_{-1} и с концентраторами σ_{-1k} напряжений связаны соотношением:

$$\sigma_{-1k} = \sigma_{-1} / k_{\sigma} \quad (2)$$

где: k_{σ} – эффективный коэффициент концентрации напряжений, который оп-

ределяется по формуле:

$$K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma}(\alpha_{\sigma} - 1) \text{ или } K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma} K \sqrt{\gamma_1 \times \frac{Rz}{r'}}. \quad (3)$$

где: q_{σ} – коэффициент чувствительности металла к концентраторам напряжений.

Для углеродистых сталей с малым радиусом закругления по дну микро-неровностей $q_{\sigma} = 0,1 \dots 0,2$; для высокопрочных сталей и сплавов, чувствительных к концентраторам напряжений, значение q_{σ} будет большим.

На эксплуатационные свойства деталей влияет не только высота микро-неровностей, но также радиусы закруглений выступов и впадин, угол наклона профиля, шаг неровностей и их направление. Для одинаковых значений шероховатости сопротивление усталости образцов с продольным направлением микронеровностей примерно в 1,5 раза выше, чем при направлении микронеровностей перпендикулярно оси образца. С уменьшением шероховатости поверхности степень влияния направления микронеровностей на усталостную прочность снижается.

Экспериментально установлено, что влияние деформационного упрочнения ПС на усталостную прочность зависит от степени деформации ПС и условий эксплуатации: температуры, нагрузки, среды, продолжительности работы.

В соответствии с современными представлениями механики деформируемого тела пластическая деформация имеет двойственную природу: с одной стороны возникает и накапливается поврежденность, с другой стороны – повышается предел текучести и возникает упрочнение металла.

Для оценки величины накопленной поврежденности используются интегральные параметры механического состояния металла – степень деформации сдвига (СДС) и степень исчерпания запаса пластичности (СИЗП). Для каждого металла и сплава в конкретных условиях эксплуатации существует определенная степень предварительной пластической деформации, которая создает субструктуру металла с величиной скрытой энергии наклепа, обеспечивающей минимальную скорость процесса разрушения, т.е. наибольшую прочность при данной температуре и нагружении.

Расчет СИЗП может осуществляться с использованием различных критериев, в основе большинства из которых лежит отношение накапливаемых деформаций к предельной деформации, накапливаемой данным металлом в зависимости от условий нагружения. Многие критерии расчета СИЗП учитывают влияние истории нагружения детали, имевшей место на предыдущих стадиях механической обработки или эксплуатационного нагружения.

Степень исчерпания запаса пластичности Ψ является безразмерной величиной, имеющей пределы изменения от 0 до 1. Значению $\Psi = 0$ соответствует исходное неупрочненное состояние металла, а $\Psi = 1$ соответствует накопление металлом предельных деформаций, полное исчерпание запаса пластичности и появление в металле несплошности в виде трещины.

По мере повышения температуры эксплуатации эффективность деформа-

ционного упрочнения снижается и после некоторой критической температуры может иметь отрицательное значение, т.е. в этих условиях наиболее высокие эксплуатационные свойства имеет недеформированный металл ($\Psi = 0$).

Технологические остаточные напряжения в зависимости от условий работы деталей могут оказывать положительное, отрицательное или несущественное влияние на их эксплуатационные свойства, в частности на усталостную прочность.

Характер и степень этого влияния определяется результатом взаимодействия остаточных напряжений с напряжениями от внешних нагрузок, характером приложения этих нагрузок (статическое, динамическое, циклическое и др.), а также влиянием окружающей среды (температура, степень агрессивности и т.п.) и структурным состоянием материала детали.

При статических нагрузках остаточные напряжения практически не влияют на показатели прочности пластичных материалов, так как при появлении небольших пластических деформаций они снимаются.

В условиях циклического нагружения при невысокой температуре остаточные напряжения оказывают существенное влияние на усталостную прочность:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1исх} - K\sigma_{ост.}, \quad (4)$$

где: $\sigma_{-1исх}$ - усталостная прочность материала без остаточных напряжений; $\sigma_{ост}$ - величина остаточных напряжений в тонком поверхностном слое (5...10 мкм); $K = 0,1...0,3$ - коэффициент влияния, меньшее значение - для пластичных, большее - для малопластичных металлов.

Как следует из формулы (4), остаточные напряжения сжатия (со знаком минус) повышают усталостную прочность, а напряжения растяжения (со знаком плюс) ее снижают. При этом остаточные напряжения сжатия в большей степени повышают предел выносливости, чем снижают его такие же по величине остаточные напряжения растяжения.

Если нагружение материала ПС детали происходит в упругой области, то напряжения в нем представляют собой алгебраическую сумму (суперпозицию) остаточных и рабочих напряжений. У пластичных материалов предел прочности на растяжение ниже, чем предел прочности на сжатие. Поэтому увеличение растягивающих напряжений приводит к ускорению разрушения при циклических нагружениях.

Вторым существенным фактором положительного влияния остаточных напряжения сжатия на усталостную прочность является то, что они не дают возможность раскрытия поверхностных дефектов в виде макро- и микротрещин, блокируют отрицательное действие концентраторов напряжений путем перераспределения напряжений у дна надреза. При этом увеличивается инкубационный период до зарождения трещины с последующим ее распространением. Иногда остаточные напряжения сжатия приводят к закрытию "залечиванию" микротрещин в результате диффузионной сварки их краев. Остаточные же напряжения растяжения наоборот способствуют раскрытию макро- и микродефектов, проникновению в поверхностные трещины внешней среды, увели-

чивая напряжения растяжения в вершине трещины и ускоряя разрушение.

Экспериментальными исследованиями установлено, что при одинаковом уровне остаточных напряжений сжатия на поверхности чем больше глубина их залегания и меньше градиент изменения напряжений по глубине, тем выше выносливость материала детали. При наличии определенного уровня остаточных напряжений сжатия на поверхности фактор изменения глубины залегания напряжений сжатия оказывает на изменение выносливости более сильное влияние, чем увеличение напряжений на поверхности.

На коррозионную стойкость металлов оказывают влияние практически все основные характеристики состояния ПС. Она увеличивается с уменьшением шероховатости поверхности, с увеличением радиусов округления впадин, с уменьшением степени и глубины наклепа, с уменьшением остаточных напряжений растяжения. Остаточные напряжения сжатия способствуют замедлению коррозионных процессов. Таким образом, при методах обработки, формирующих поверхностный слой с небольшой шероховатостью, без глубоких отдельных рисок, сглаженного профиля неровностей, с малой глубиной и степенью наклепа (или без наклепа), остаточные напряжения сжатия обеспечивают высокую коррозионную стойкость деталей.

В процессе эксплуатации состояние ПС деталей непрерывно меняется, что проявляется в изменении шероховатости, степени и глубины наклепа, остаточных напряжений, фазового и структурного состояния, физико-химических свойств.

Так, у трущихся деталей в начальный период работы контакт поверхностей происходит по вершинам неровностей, в местах контакта развиваются напряжения, часто превышающие предел текучести материала. Происходит упругая и пластическая деформация сжатия и сдвига вершин неровностей, приводящая к интенсивному начальному изнашиванию трущихся деталей.

Для поверхностей деталей, работающих в легких и средних условиях, в период начального изнашивания высота неровностей Rz уменьшается на 65...75% при одновременном увеличении фактической площади их контакта и снижении удельного давления. При этом высота неровностей уменьшается или увеличивается до некоторого оптимального значения, различного для разных условий трения (рис. 2.8).

Для обеспечения требуемой долговечности работы узлов трения машин необходима приработка их деталей. Процесс приработки трущихся деталей сопровождается не только изменением исходной шероховатости ПС, но также микротвердости и остаточных напряжений, образовавшихся в процессе изготовления, до некоторых оптимальных эксплуатационных значений этих характеристик.

У деталей малых размеров и высокой точности величина начального изнашивания микронеровностей может быть соизмеримой с допуском на изготовление детали, т.е. такие детали могут выйти из строя еще на стадии приработки. Рекомендуется назначать параметры шероховатости немного большие, чем оптимальные. Это уменьшает затраты на обработку деталей и незначительно удлиняет величину начального износа и время приработки.

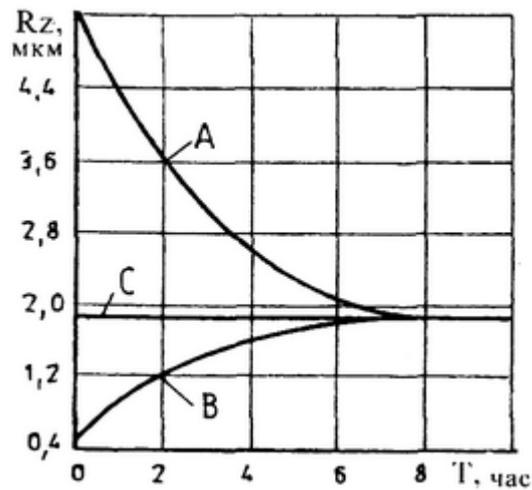


Рис. 2.8. Изменение шероховатости трущихся пар по времени при разной начальной шероховатости: А – поверхность с шероховатостью больше оптимальной; В – поверхность с шероховатостью меньше оптимальной; С – оптимальная шероховатость;

В связи с тем, что при трении происходят микропластические деформации ПС, они вызывают его наклеп и образование эксплуатационных остаточных напряжений. Технологические остаточные напряжения изменяются. Эксперименты показали, что остаточные напряжения растяжения уже через несколько тысяч циклов переходят в напряжения сжатия и в дальнейшем практически не изменяют своей величины и знака.

При циклических нагрузках (знакопеременном изгибе, изгибе с растяжением или сжатием, сжатии-растяжении) в зависимости от величины остаточных и рабочих напряжений, температуры и циклической наработки исходные остаточные напряжения перераспределяются. В основном они релаксируют (уменьшаются), иногда изменяют знак, т.е. формируются новые остаточные напряжения (эксплуатационные).

Скорость релаксации остаточных напряжений определяется релаксационной стойкостью металла, суммарной величиной (суперпозицией) остаточных напряжений и напряжений от внешних нагрузок, а также температурой, временем работы и окружающей средой.

В условиях циклического нагружения остаточные напряжения релаксируют независимо от их знака при любой температуре. При этом может произойти полная релаксация остаточных напряжений при невысоких температурах, если напряжения от внешних нагрузок большие, а их сумма с остаточными напряжениями достигает предела текучести и вызывает местную пластическую деформацию металла.

С ростом температуры фактический предел текучести сталей и сплавов снижается и релаксация остаточных напряжений усиливается. Нагрев ниже 700°C не вызывает заметного снижения остаточных напряжений, т.к. условный предел текучести при 700°C снижается только на 7% по сравнению с пределом текучести при 20°C , в то время как увеличение температуры до 900°C снижает σ_{02} на 50%.

2.4. Технологическое наследование

Технологическим наследованием называется совокупность сложных явлений переноса комплекса зависимых друг от друга свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций к последующим, которое в дальнейшем сказывается на эксплуатационных характеристиках деталей машин, а сохранение указанных свойств называется **технологической наследственностью** [12-14].

Явление **технологической наследственности** выражается влиянием предшествующих операций на конечные свойства восстанавливаемых деталей.

Последовательность операций в процессе восстановления детали подчинена накоплению и усилению необходимых свойств детали под влиянием вложенных в заготовку материалов и энергии. Перед нежелательными свойствами ставятся технологические «барьеры».

Первые операции обычно влияют на эти свойства слабее, чем заключительные. Все операции процесса восстановления детали рассматривают не изолированно друг от друга, а во взаимосвязи, потому что формирование конечных свойств поверхностей происходит на протяжении всего процесса изготовления или восстановления детали.

За форму и взаимное расположение поверхностей в наибольшей степени отвечают первые операции механической обработки, за размеры и шероховатость – последние, за износостойкость – материалы, операции нанесения покрытий и/или термической обработки, за усталостную прочность и жесткость – термические операции или упрочняющая обработка методами ППД.

Технологическая наследственность по шероховатости поверхности, например, проявляется на операциях предварительной и черновой обработки, на заключительных операциях копирование исходной шероховатости угасает. Значительно наследуются параметры формы и расположения поверхностей.

Однотипные операции (предварительную механическую обработку, нанесение покрытий, термическую и механическую обработку и др.) при восстановлении различных элементов детали объединяют в блоки операций и выполняют вместе.

Все технологические операции, связанные с вложением тепла в материал детали, должны быть объединены в одной части технологического процесса и отделены от последующих операций термической обработкой. Эта операция после нанесения покрытия служит технологическим «барьером» для внутренних напряжений, роста зерна материала и пластической деформации детали.

При черновой мех. обработке снимают основную часть операционного припуска. Если условно разделить этот вид обработки на две части, то в первой обеспечивают нужное взаимное расположение поверхностей детали, а во второй – форму ее геометрических элементов. Точности взаимного расположения поверхностей достигают выбором технологических баз и ориентированием детали относительно движущегося инструмента, а точности формы – жесткостью и точностью оборудования, выбором инструмента и режимами обработки.

Черновая обработка обычно лезвийная, она выполняется на токарных, расточных и фрезерных станках. Реже она бывает абразивной.

В результате чистовой обработки получают заданную точность размеров и шероховатость поверхностей, близкую к нормативной. Чистовая обработка для шеек валов – это в большинстве случаев абразивная обработка, а для отверстий – тонкое растачивание и хонингование.

Детали, воспринимающие знакопеременную нагрузку, проходят после чистовой обработки операцию поверхностного пластического деформирования, назначение которой – закрыть микротрещины и создать наклепанный слой с остаточными напряжениями сжатия. Поверхностное пластическое деформирование реализуется механическими или термомеханическими способами.

Примером термомеханического способа пластического деформирования является электромеханическая обработка (ЭМО). В процессе электромеханической обработки ППД через место контакта инструмента с заготовкой проходит ток большой силы и низкого напряжения. Структурно-фазовые превращения осуществляются за счет закалки, происходящей от нагрева пятна контакта и быстрого отвода тепла в деталь, что позволяет значительно повысить характеристики качества поверхности. Исследования показали высокую эффективность ЭМО, позволяющей повысить износостойкость подвижных сопряжений в 2-6 раз, усталостную долговечность деталей, работающих при циклических нагрузках на 30..70% [11, 14, 17-19].

Назначение отделочных операций (полирования, суперфиниширования, хонингования) заключается в снятии разупрочненного в результате механической обработки слоя и обеспечении требуемой шероховатости поверхности.

На обработанных деталях находятся технологические загрязнения (стружка, зерна абразивного инструмента, остатки СОЖ, полировальные пасты и др.), которые способны в течение нескольких часов работы вызвать отказ системы смазки отремонтированного агрегата или агрегата в целом. Детали, направляемые на сборку, должны быть очищены от этих загрязнений. Особое внимание уделяют очистке масляных каналов и внутренних полостей.

Операция контроля заключается в установлении соответствия состояния восстановленной детали требованиям технической документации (чертежа или карты технического контроля). Контрольная операция оснащена средствами для измерения геометрических параметров, значений физико-геометрических свойств и других характеристик.

Консервационную защиту деталей до 3...5 дней обеспечивают технические моющие средства, применяемые для очистки деталей. Для более длительного хранения (это относится к деталям, предназначенным для продажи) необходима специальная консервация маслами, промасленной бумагой, парафинсодержащими и другими средствами.

Технологические операции указанных типов выполняются на любом ремонтном предприятии, однако число освоенных видов операций каждого типа зависит от мощности и технического уровня отдельного завода.

3. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОИЗВОДСТВА ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ДЕТАЛЕЙ

3.1. Определение детали и ее состояний

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.

Примеры состояний детали, при которых ее восстановление невозможно: 1) необратимые явления усталости; 2) межкристаллитная коррозия металлических материалов; 3) потеря прочности деталей из полимерных материалов в результате старения.

3.2. Классификация деталей и их элементов

Выделение классификационных групп восстанавливаемых объектов необходимо для сокращения объема однотипных работ при технологической и организационной подготовке восстановительного производства [20].

При построении классификаций деталей исходят из различных признаков, среди которых: наименование, отраслевая принадлежность, геометрическая форма контура детали, форма отдельных элементов, значения основных параметров, размеры, функции, выполняемые деталью, материал, совокупность операций при изготовлении, показатели точности, шероховатость поверхности, масса, дополнительная информация.

В качестве классификационных признаков выбирают виды рабочих поверхностей деталей, на которых предусматривают припуски для последующей механической обработки с сопутствующей термической обработкой. Рассматриваемое множество деталей представляют матрицей вида:

$$\|C_{ij}\| = \begin{vmatrix} F_1 & F_1 & \dots & F_n \\ C_{11} & C_{11} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & & \dots & \\ C_{m1} & C_{m1} & \dots & C_{mn} \end{vmatrix} \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{matrix}, \quad (5)$$

где $F = (F_1, F_2, \dots, F_n)$ – множество классификационных признаков деталей; $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ – множество деталей; $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$; C_{ij} – переменная, принимающая значение 1, если деталь имеет признак F_i , или 0, если такой признак отсутствует.

Фактор объективности требует применения количественного критерия для разделения деталей на классификационные группы. Рассчитывают коэффициент подобия деталей K_n в каждой их паре:

$$K_n = n_1/n_2, \quad (6)$$

где n_1 – число совпадающих признаков; n_2 – общее число различающихся между собой признаков деталей этой пары.

В одну классификационную группу должны входить детали, у которых не менее половины признаков одинаковые. Вначале находят детали с полным совпадением классификационных признаков, т.е. для которых $K_n = 1$. Затем эти группы дополняют деталями, совпадающими с каждой из ранее введенных групп не менее как половиной признаков. Если отдельную деталь можно отнести к нескольким группам, то предпочтение отдают той группе деталей, с которой данная деталь имеет наибольшее среднее арифметическое коэффициентов подобия. Оставшиеся детали группируют в новые подмножества с учетом приведенных принципов.

Работы по классификации ремонтируемых объектов проводят для конкретных ремонтных предприятий.

Наибольшее влияние на надежность отремонтированных агрегатов оказывает качество восстановления таких групп деталей:

- неподвижных: станин, корпусов, картеров, гильз;
- вращающихся: валов, дисков, зубчатых колес, кулачков, эксцентриков;
- движущихся поступательно: поршней, штоков, ползунов, клапанов;
- участвующих в преобразовании видов движений: рычагов, шатунов, штанг.

Около 90% трудоемкости и себестоимости приходится на восстановление приведенных групп деталей. Технологии их восстановления могут быть использованы как типовые.

Многообразие видов восстанавливаемых объектов еще больше сокращается при переходе от деталей к их элементам и классификации последних (таблица 2). Элементам деталей соответствуют характерные повреждения и совокупность восстанавливаемых свойств.

Организация процессов восстановления деталей, основанная на использовании классификации элементов этих деталей, обладает экономическими преимуществами. Такая организация предполагает разработку технологических модулей восстановления элементов разнотипных деталей, из которых образуют

технологии восстановления конкретных деталей. Эффект от такого подхода выражается в уменьшении трудоемкости технологической подготовки восстановительного производства. Основной методологический принцип концепции заключается в применении ограниченного числа типовых и модульных технологических операций восстановления элементов деталей к восстановлению деталей различных видов.

Таблица 2

Основные виды деталей, виды нагрузок и повреждений,
восстанавливаемые свойства

Элементы деталей			Восстанавливаемые свойства
Наименование	Виды нагрузок	Характер повреждений	
Стенки	Удары, гидростатическое давление	Пробоины, трещины	Прочность, герметичность
Шейки	Моменты и поперечные силы, переменные по величине и направлению	Износ, усталостные трещины	Износостойкость, форма, размеры, шероховатость, усталостная прочность
Прямолинейные направляющие	Осевые силы	Износ	Износостойкость, форма, размеры, шероховатость
Трущиеся торцы			
Стыки	Усилие смыкания деталей	Деформации	Плоскостность, параметры расположения
Бобышки с гладкими отверстиями	Поперечные силы, переменные по величине и направлению	Деформации, износ	Износостойкость, форма, размеры, шероховатость
Резьбовые отверстия	Усилие затяжки, вибрации	Деформации, износ, разрушение резьбы	Форма, размеры, шероховатость
Наружные резьбы			
Конические фаски	Осевые силы, переменные по величине	Износ, наклеп	Износостойкость, форма, размеры, шероховатость
Зубья	Контактные нагрузки	Питтинговый износ, разрушение	Износостойкость, форма, размеры, шероховатость, усталостная прочность
Кулачки, эксцентрики	Поперечные силы	Износ	Износостойкость, форма, размеры, шероховатость
Шлицы	Силы, нормальные к поверхностям		
Упругие элементы	Вибрационные нагрузки	Изменение размеров, усталостные трещины, потеря жесткости	Размеры, усталостная прочность, жесткость

3.3. Технические требования к восстановленным деталям

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.

Требования: чистота (в виде остаточной загрязненности) и шероховатость поверхностей, форма и взаимное расположение элементов деталей, точность размеров, жесткость упругих элементов, сплошность стенок корпусных деталей, значение массы движущихся деталей и ее распределение относительно осей вращения и инерции.

Задача технолога состоит в разработке технологического процесса, который обеспечит указанные ограничения при наименьшем расходе материальных, трудовых и энергетических ресурсов [20].

3.4. Структура процесса восстановления деталей

Износенная деталь ремонтного фонда на пути своего превращения в годную деталь в результате технологических воздействий на нее исполнителей и средств ремонта проходит такие стадии (рис. 3.1): **исходная заготовка, ремонтная заготовка, восстановленная деталь** [20].

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 мех. 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.

Ремонтное производство располагает множеством способов создания припусков под механическую обработку на восстанавливаемых поверхностях. Это различные виды наплавки, напыления, нанесения гальванических покрытий, объемного пластического деформирования, установки ДРД и др.

Ряд деталей машин (валы, гильзы, поршни и др.) допускают восста-

новление под ремонтные размеры их шеек, отверстий и плоскостных элементов. В таком случае ремонтные заготовки получаются из исходных заготовок без нанесения или перемещения материала. Для достижения экономичности процесса восстановления должны быть использованы все предусмотренные ремонтные размеры заготовок путем:

- обеспечения производства сопрягаемыми деталями всех ремонтных размеров (например, вкладышами коленчатого вала, поршнями и др.);
- правки длинных деталей типа валов перед обработкой;
- равномерного снятия припуска при механической обработке, чему способствует совмещение осей обрабатываемых отверстий и шпинделя расточного станка, а также адаптивное базирование деталей при обработке шеек.

Если возможность использования ремонтных размеров исчерпана, то ремонтную заготовку создают путем нанесения восстановительного покрытия или установкой и закреплением ДРД, или перемещением материала заготовки.

Необходимая износостойкость восстанавливаемых поверхностей достигается выбором их материала, условий его нанесения, а также последующей термической, химико-термической и механической обработкой. Вид и свойства поверхностного слоя должны быть совместимы со способом его обработки.

На стадии создания ремонтной заготовки в основном формируются материал и структура рабочих поверхностей детали, что определяет ее послеремонтную надежность.



Рис. 3.1. Схема технологического процесса восстановления детали

4. ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО В ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА МАШИН

4.1. 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 [20].

Ремонт машин заключается в экономически обоснованном устранении неисправностей и восстановлении их ресурса после длительной эксплуатации, т.е. во вторичном производстве техники из ее ремонтного фонда.

В большинстве отраслей промышленности действует система мер по содержанию машин в исправном состоянии, которая имеет профилактическую направленность и учитывает закономерности изнашивания машин. Эта система носит плано-предупредительный характер и включает в себя **совокупность исполнителей, технологического оборудования, оснастки и документации.**

Функции системы включают два вида воздействий.

Воздействия 1-первого вида выполняются в плановом порядке и направлены на уменьшение интенсивности изнашивания деталей за счет предупреждения и своевременного выявления неисправностей. Реальные неисправности выявляются в результате осмотра, контроля и проверки действия механизмов, а потенциальные предупреждаются за счет проведения уборочно-моечных, смазочных, крепежно-регулирующих и диагностических работ. Это множество работ называется **техническим обслуживанием** и направлено на продление времени пребывания машин в исправном или работоспособном состоянии при их использовании по назначению, хранении или транспортировании.

Воздействия 2-го вида необходимы для устранения неисправностей машин и восстановления их ресурса путем замены или восстановления изношенных деталей и (или) сборочных единиц. Эти работы называются **ремонтom** и выполняются в большинстве случаев по потребности, которая возникает при отказе машины или определяется путем ее диагностирования.

Наиболее перспективна плано-диагностическая система ремонтов, основанная на измерении диагностических параметров, определении неисправностей и остаточного ресурса агрегатов и принятии решения о сроках и объемах ремонтных работ.

Главная задача ремонтного производства – экономически эффективное восстановление надежности машин в результате наиболее полного использования остаточной долговечности их деталей.

Таким образом, в системе технического обслуживания и ремонта машин предусмотрены их диагностирование, техническое обслуживание и ремонт, при этом техническое обслуживание проводится принудительно по плану, а ремонтные работы – по потребности.

4.2. Определение понятий «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.

Процессы восстановления изношенных деталей составляют основу всего процесса ремонта машин.

Каждое свойство (показатель) является одной из характеристик качества восстановленной детали. При восстановлении детали обеспечивают нормативные значения функциональных и ресурсных показателей. Функциональные показатели характеризуют исправность детали, а ресурсные – степень восстановления технического ресурса.

При восстановлении деталей, в том числе и их элементов, доводят до нормативных значений следующие показатели:

- чистоту поверхностей;
- износостойкость трущихся элементов;
- сплошность, прочность, структуру и строение материала;
- усталостную прочность;
- жесткость упругих деталей;
- взаимное расположение и форму элементов;
- размеры и шероховатость рабочих поверхностей;
- значение массы детали и ее распределение относительно осей вращения и инерции;
- коррозионную стойкость.

Чистоту поверхностей восстанавливают путем их очистки от эксплуатационных и технологических загрязнений. Наибольшую трудность представляет очистка поверхностей от прочных эксплуатационных загрязнений (накипи, нагара и асфальтосмолистых загрязнений) во внутренних полостях и каналах.

Взаимное расположение, форму, размеры и шероховатость рабочих поверхностей восстанавливают механической обработкой этих поверхностей, в большинстве случаев после нанесения восстановительных покрытий. Взаимное расположение рабочих поверхностей можно восстанавливать и пластическим деформированием материала детали путем ее правки.

Износостойкость трущихся поверхностей, химический состав материала поверхностного слоя и его структуру восстанавливают нанесением восстанови-

тельных покрытий необходимого состава, термической (химико-термической) обработкой и поверхностным пластическим деформированием.

Прочность детали восстанавливают установкой и закреплением дополнительных элементов и сваркой. Сплошность и герметичность стенок восстанавливают наложением сварочных швов (валиков) и пропиткой герметизирующими составами.

Усталостную прочность элементов и жесткость детали восстанавливают соответственно поверхностным и объемным пластическим деформированием материала.

Необходимого значения массы детали и ее распределения относительно осей вращения и инерции достигают установкой уравновешивающих грузов требуемой массы в определенных местах детали или соответствующим удалением части ее материала.

Коррозионную стойкость детали восстанавливают нанесением защитных покрытий (гальванических или лакокрасочных).

В процессе контроля устанавливают соответствие фактических значений свойств восстанавливаемой детали их значениям, которые установлены нормативной документацией. На основании этого сопоставления принимают решение о годности детали.

Процесс восстановления деталей включает операции: очистки, определения технического состояния, принятия решения по процедуре восстановления, создания ремонтных заготовок с припуском на восстанавливаемых поверхностях, термической (химико-термической) и механической обработки, поверхностного или объемного пластического деформирования, обеспечения значения массы, уравновешивания, нанесения защитных покрытий, контроля и консервации.

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.

4.3. Восстановление деталей в процессе ремонта машин

Трудоемкость восстановления деталей составляет 30...50% общей трудоемкости процесса ремонта машин и является частью процесса ремонта машин (рис. 4.1).

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.

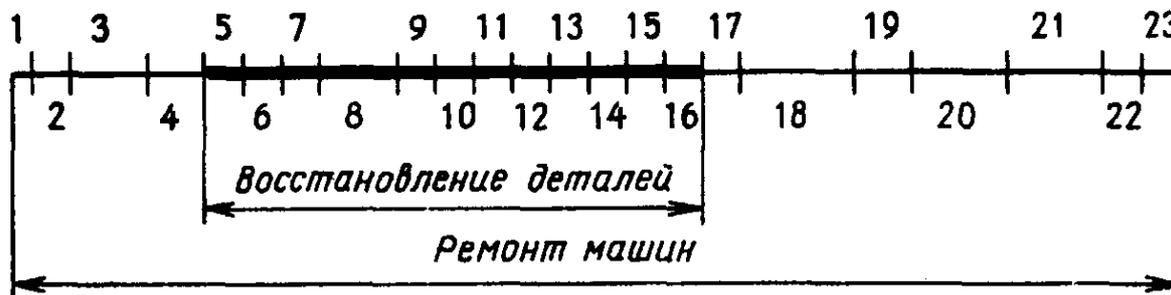


Рис. 4.1. Операции восстановления деталей в процессе ремонта машин: 1 – приемка машин в ремонт; 2 – диагностирование агрегатов; 3 – разборка машин, агрегатов и узлов; 4 – очистка машин, агрегатов, узлов; 5 – очистка деталей; 6 – определение технического состояния деталей; 7 – предварительная механическая 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

4.4. 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.

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.

Элементы производственной системы по восстановлению деталей – это сооружения (здания, инженерные сети, ограждения и др.), средства восстановления (оборудование, приспособления, инструмент) и работники.

Функция системы – переработка восстанавливаемых объектов из состояния ремонтного фонда в состояние товарной (восстановленной) продукции. Система получает питание в виде ресурсов (финансовых, трудовых, материальных и энергетических) из внешней среды и взаимодействует с ней. Обратная связь между восстановленными изделиями и производственной системой выражается информацией о качестве изделий, в том числе о послеремонтной наработке.

На основании сведений, полученных по обратной связи, вырабатываются управляющие воздействия, направленные на повышение качества восстанавливаемых объектов и уменьшение расхода ресурсов путем усовершенствования применяемых материалов, технологий, средств восстановления и организации производства. Носителем нормативной, конструкторской, технологической, организационной, распорядительной информации служит соответствующая документация.

В соответствии с поставленной целью задачами производства по восстановлению изношенных деталей должны стать:

- получение заданных объемов выпуска восстановленных деталей и их номенклатуры;
- удовлетворение множества требований нормативной и технологической документации к параметрам деталей;
- минимально необходимый расход производственных ресурсов.

4.5. Отличительные особенности и структура восстановительного производства

Ремонтно-восстановительное производство отличается от машиностроения рядом признаков (рис. 4.2). 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.

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.

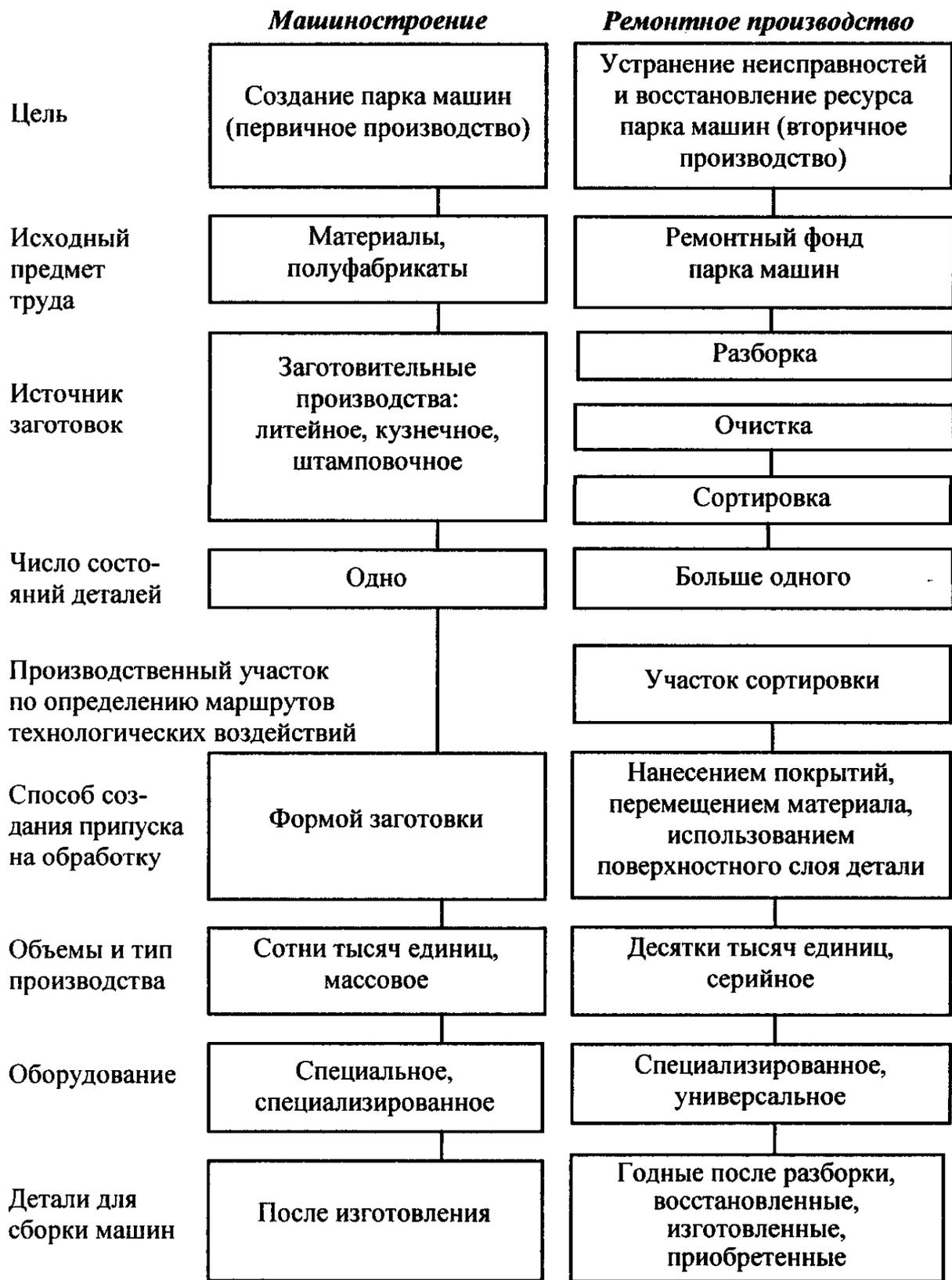


Рис. 4.2. Сопоставление признаков машиностроения и ремонтного производства

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

Основное производство (в соответствии с ГОСТ 14.004-83) – 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. Основное восстановительное производство по технологическому признаку включает следующие цехи (участки): разборочно-очистной, определения повреждений и остаточного ресурса изделий (предремонтного диагностирования), накопления и сортировки деталей, комплексного или централизованного восстановления деталей, нанесения покрытий (наплавочных, напыленных, гальванических и др.), кузнечно-штамповочный, механической обработки деталей, переработки резины и пластмасс, медницкий, послеремонтного диагностирования и устранения дефектов.

Функции основных производственных участков следующие:

Предремонтное диагностирование восстанавливаемых объектов состоит в определении их технического состояния (вида неисправностей), выявлении причин неисправностей и определении объема работ по их устранению.

Разборочно-очистной участок служит для получения очищенных исходных заготовок ремонта, которые в зависимости от их технического состояния будут направлены на сборку агрегатов или на восстановление.

На участках восстановления удаляют поврежденные части деталей, закрепляют ДРД, наносят восстановительные покрытия, выполняют пластическое деформирование, ведут механическую обработку поверхностей для придания им необходимых форм, размеров, расположения и шероховатости и термическую обработку для придания восстанавливаемым элементам необходимых свойств, балансируют детали. Наплавочные и напыленные покрытия наносят непосредственно на участках восстановления деталей. Исключение составляют процессы нанесения гальванических и полимерных покрытий, которые по причине большого количества выделяющихся при этом вредных веществ выполняют в отдельных помещениях.

Восстановленные детали после технического контроля направляют на комплектовочный участок для последующей сборки агрегатов или на склад сбыта для продажи в виде товарной продукции.

Вспомогательное производство ремонтного завода (в развитие ГОСТ 14.004-83) 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 заводууправления 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.

4.6. Определение технического состояния и сортировка исходных заготовок. Виды и классификация повреждений

Исходные заготовки ремонта (очищенные детали ремонтного фонда) сортируются на три группы: годные для дальнейшего применения, подлежащие восстановлению и утильные. Работы по **определению технического состояния исходных заготовок** состоят в измерении значений установленных параметров и отнесении этих заготовок к одной из трех названных групп. На заготовках второй группы находят сочетания повреждений и устанавливают маршруты восстановления. Работы выполняются на сортировочном участке.

Повреждения деталей – это недопустимые, приобретенные в эксплуатации отклонения значений свойств их материала и геометрических параметров от начальных, заложенных при изготовлении или ремонте.

В зависимости от природы возникновения повреждения деталей бывают в виде: **износов, усталостных изменений, деформаций, трещин, пробоин, коррозии и старения материала**. Повреждения по месту возникновения подразделяются на **наружные и внутренние**. Наружные повреждения определяют осмотром или измерениями, а внутренние – средствами структуроскопии.

Основные характеристики повреждений:

- отклонения размеров, формы и взаимного расположения элементов от нормативных значений;
- размеры трещин и пробоин;
- расход среды из-за течей;
- механические.

4.7. Процессы и средства для определения повреждений

Операции по определению повреждений следующие:

- простукивание и наружный осмотр;
- измерения линейных и угловых размеров;

- измерение параметров формы и расположения поверхностей;
- обнаружение поверхностных трещин;
- определение течей;
- измерение специальных характеристик.

Простукивание применяют для определения «ослабленных» посадок шеек, шипов, штифтов и заклепок и контроля резьбовых сопряжений с натягом. Детали с натягом разбирают только при необходимости.

Обломы и наружные большие трещины определяют **осмотром**. При осмотре используются различные лупы и микроскопы.

Для **контроля линейных размеров** элементов деталей применяют универсальный инструмент: штангенциркули, штангензубомеры, штангенглубиномеры, гладкие микрометры, индикаторные нутромеры и скобы. Для повышения производительности измерений широко применяют специальные средства – непроходные неполные предельные калибры.

Резьбовые шейки осматриваются, а наиболее ответственные из них контролируются резьбовыми калибрами.

Если деталь признается годной по линейным параметрам, то проверку продолжают для выявления годности по параметрам формы и расположению поверхностей.

Отклонение от круглости измеряют кругломерами, от плоскостности – с помощью щупов или оптико-механическими приборами.

Отклонения от взаимного расположения поверхностей измеряют с помощью специальных средств, оснащенных индикаторами часового типа.

Для **обнаружения поверхностных усталостных трещин**, неразличимых визуально, в деталях ремонтного фонда применяют магнитные, капиллярные и звуковые способы контроля. Перспективно использование рентгено- и гамма-дефектоскопии.

Магнитные способы применяют для контроля деталей из ферромагнитных материалов. Трещины в материале детали или включения обуславливают иную, чем в основном материале, магнитную проницаемость. Способы основаны на определении в месте повреждения магнитного поля рассеяния. Эти способы надежны и просты, поэтому получили широкое распространение.

Сущность магнитного способа определения повреждений заключается в том, что магнитный поток, встречая на своем пути повреждение с низкой магнитной проницаемостью по сравнению с ферромагнитным материалом, огибает его. Часть магнитного потока выходит за пределы детали, образуя поле рассеяния. Поиск последнего составляет содержание способа.

По способу определения магнитного поля рассеивания различают следующие виды контроля: магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый и др. Наибольшее распространение в ремонте из магнитных способов получил магнитопорошковый.

Магнитопорошковый контроль включает следующие операции: подготовку детали к контролю, ее намагничивание, нанесение на проверяемую поверхность магнитного порошка или его взвеси, обнаружение повреждения и

размагничивание детали.

Для визуального определения магнитных полей рассеяния над трещинами служат магнитные порошки (сухие или в виде суспензий).

Для контроля деталей с темной поверхностью используют светлые порошки (с добавлением алюминиевой пудры) или люминесцентные порошки.

Скопления порошка над трещинами намагниченных деталей выявляют форму и размеры этих трещин.

Повреждения обнаруживаются, когда направление магнитного поля перпендикулярно к трещине. Поэтому простые детали намагничивают в одном направлении, а детали сложной формы – в нескольких. Для создания наилучших условий контроля применяют три способа намагничивания: **циркуляционное, полюсное и комбинированное.**

Циркуляционное (поперечное) намагничивание производят пропусканием тока под напряжением 12 В через контролируемую деталь (рис. 4.3, а) или через проводник, помещенный в отверстие детали. В этом случае хорошо обнаруживаются продольные трещины.

Полюсное (продольное) намагничивание до напряженности 480 А/см осуществляется с помощью электромагнитов или соленоидов (рис. 4.3, б), при этом деталь намагничивается вдоль своего наибольшего размера и на ней обнаруживаются поперечные трещины. С применением полюсного намагничивания невозможно определить трещины, расположенные под углом 65...70° к продольной оси детали.

Комбинированное намагничивание (рис. 4.3, в) осуществляется при одновременном намагничивании детали двумя или несколькими магнитными полями разного направления для обнаружения трещин любого направления.

Для определения повреждений может быть использован как постоянный, так и переменный ток. Постоянный ток применяют только для выявления поверхностных дефектов, магнитное поле, создаваемое им, однородно и проникает достаточно глубоко в деталь. Переменный ток служит для выявления поверхностных повреждений и размагничивания деталей.

В приложенном магнитном поле определяют повреждения деталей из магнитомягких материалов (Ст 2, Ст 3, от стали 10 до стали 40 и др.), а в поле остаточной намагниченности – детали, изготовленные из магнито жестких материалов (легированных и высокоуглеродистых сталей).

Детали с отношением длины к ширине > 5 размагничивают перемещением их через открытый соленоид. Короткие детали с большим поперечным сечением размагничиваются плохо. Поэтому их предварительно собирают в пакет и располагают вдоль соленоида.

Магнитографический способ определения трещин заключается в намагничивании детали при одновременной записи магнитного поля на магнитную ленту, покрывающую деталь, и последующей расшифровке полученной информации.

Степень размагниченности проверяют путем осыпания детали стальными опилками. На поверхностях размагниченных деталей опилки не удерживаются.

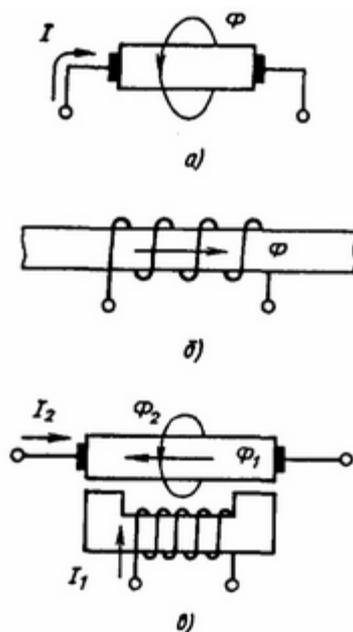


Рис. 4.3. Схемы намагничивания деталей

Капиллярный способ является основным при контроле деталей из цветных материалов, а также дополнительным при магнитопорошковом контроле. Способ обладает высокой чувствительностью, с его помощью можно при выполнении технологических процессов определять шлифовальные и термические трещины, волосовины, поры и др.

Сущность способа заключается в том, что на очищенную поверхность детали с повреждением наносят проникающую жидкость (пенетрант), дают выдержку для проникновения жидкости в полость повреждения, удаляют ее остатки с поверхности детали, высушивают деталь и в заключение вызывают проникающую жидкость на поверхность детали. Чем глубже трещина, тем более широкая полоска жидкости будет на поверхности детали.

Извлечение проникающей жидкости из трещины на поверхность детали производят сорбционным или диффузионным способом. В первом случае на поверхность детали наносят сухой порошок силикагеля, каолина, мела и др. (сухой способ) или средство в виде их суспензий в воде или органических растворителях (мокрый способ). Во втором случае наносят покрытие, в которое диффундирует проникающая жидкость из области дефекта. Этот способ более чувствителен, чем сорбционный, его применяют для обнаружения мелких трещин.

Для лучшего выявления полоски проникающей жидкости над трещиной в ее состав вводят цвето- и (или) светоконтрастные или люминесцентные вещества.

Поверхностные трещины на деталях несложной формы определяют с помощью **ультразвуковых дефектоскопов**, использующих звуковые волны частотой 0,5...15 МГц. Наибольшее применение нашли устройства, работающие по принципу излучения и приема бегущих и стоячих акустических волн (рис. 4.4). В свою очередь, устройства, в которых применяют бегущие волны, делят на три группы: **использующие прохождение и отражение волн и импедансные**.



Рис. 4.4. Классификация акустических способов контроля

Способы прохождения волн подразделяют на **теневой** и **временной**. Теневой способ учитывает уменьшение амплитуды волны, прошедшей повреждение (рис. 4.5). Временной способ основан на запаздывании импульса, вызванного огибанием повреждения волнами.

Способ отражения волн (эхоспособ) состоит в сопоставлении времени перемещения отраженных волн от повреждения и противоположной поверхности изделия (рис. 4.6). Эхопоспособ применяется в том случае, когда доступ к поверхности детали возможен с одной стороны.

Импедансный способ заключается в анализе изменения механического импеданса поврежденного участка поверхности контролируемого объекта, с которым взаимодействует преобразователь. Об изменении импеданса судят по характеристикам колебаний преобразователя: частоте, амплитуде, фазе.

Сравнительный ультразвуковой способ основан на сопоставлении реальной ультразвуковой характеристики изделия с эталонной. Эталонные значения вибрационных сигналов получают с заведомо годной для восстановления детали.

Наличие повреждений или изменение свойств материала при **резонансном** способе контроля определяют по изменению резонансных частот по сравнению с этими частотами для годной детали.

Согласно способу свободных колебаний в части изделия ударом возбуждают механические колебания и анализируют спектр возбуждаемых частот. В изделиях с трещинами спектр, как правило, смещается в высокочастотную сторону.

Внутренние полости некоторых деталей или сопряжений пар деталей проверяют на **герметичность**. Это свойство определяет способность конструкции или материала препятствовать проникновению жидкости или газа. В качестве пробного вещества применяют воду, керосин или воздух. Количественная характеристика герметичности выражается расходом газа или жидкости, протекающими через течь, или падением давления в полости за единицу времени.

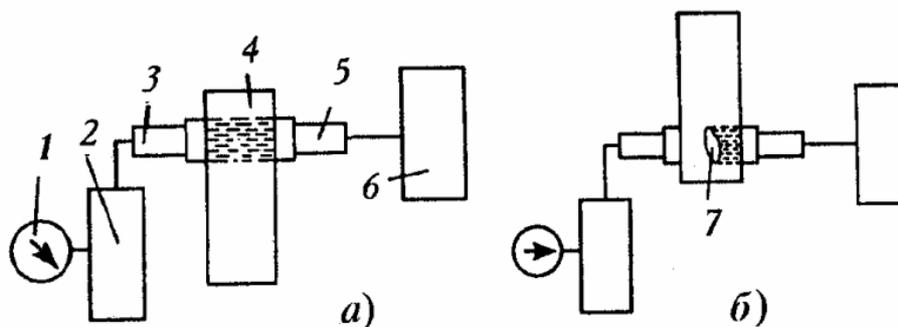


Рис. 4.5. Схемы определения повреждений теньвым способом:
 а – заготовка без повреждения; б – заготовка с повреждением;
 1 – индикатор; 2 – усилитель; 3 – пьезоприемник; 4 – заготовка;
 5 – излучатель; 6 – генератор; 7- повреждение

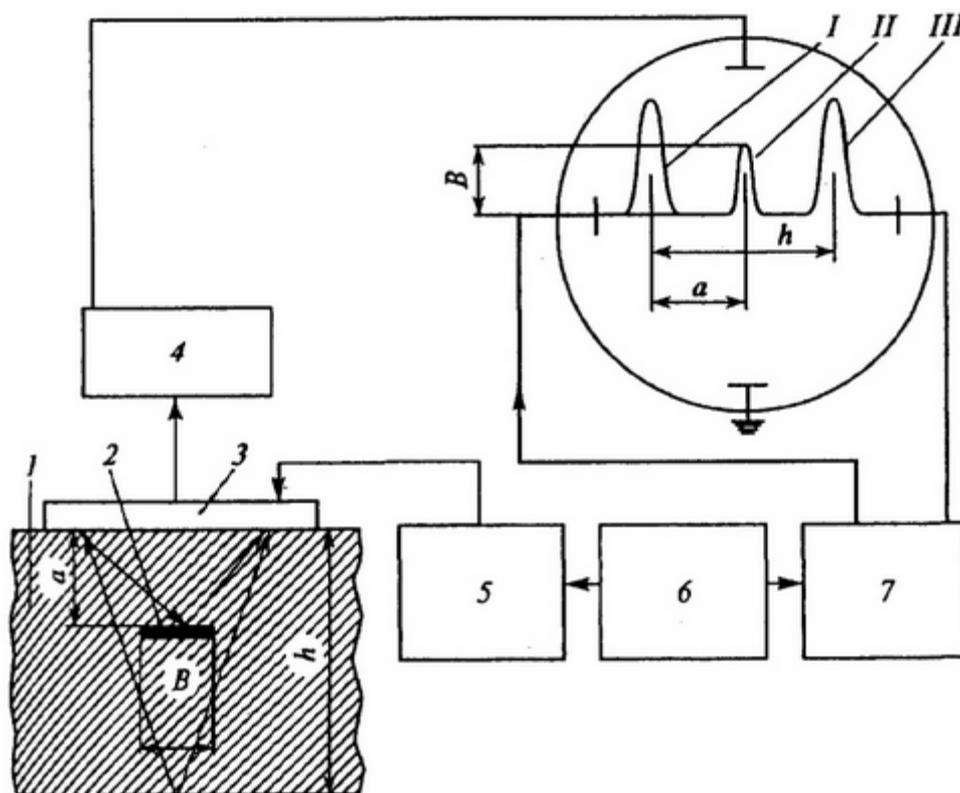


Рис. 4.6. Схемы определения повреждений эхоспособом:
 1 – заготовка; 2 – повреждение; 3 – преобразователь; 4 – усилитель;
 5 – генератор; 6 – синхронизатор; 7 – блок развертки;
 I, II, III – импульсы соответственно зондирующий, от повреждения и донный; B – относительный размер повреждения; h – толщина заготовки; a – глубина расположения повреждения

4.8. Ремонтные заготовки. Назначение, классификация и способы создания

Доля трудоемкости, связанной с превращением исходных заготовок в ремонтные, составляет 22...27% от общей трудоемкости ремонта машин. В свою очередь, 80...85% этой доли трудоемкости приходится на базовые и основные детали агрегатов (корпусные детали, валы, гильзы цилиндров, шатуны и др.).

Ремонтную заготовку можно получить различными способами, однако некоторое множество этих способов представляет рациональную область технических решений, а самое лучшее из них – оптимальное решение.

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

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

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

Во втором случае материал детали перемещают путем его пластического деформирования из неизнашиваемого объема в зону будущей обработки.

В третьем случае на поверхность восстанавливаемого элемента наносят покрытия. Этот способ наиболее распространен.

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.

Необходимый градиент значений свойств покрытия по его толщине обеспечивает послойный его синтез за счет поочередного нанесения различных материалов, или изменения режимов нанесения одного материала, или обработки поверхностного слоя.

В основу **классификации** способов создания припусков на восстанавливаемых поверхностях положены признаки превращения основного материала в покрытие, а также виды потребляемой энергии. Процесс создания ре-

монтажных 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.).

Описание множества сочетаний видов признаков без пропусков и повторов включает в себя прогрессивные и новые способы создания ремонтных заготовок.

Ремонтные заготовки получают без вложения или с вложением материалов в исходные заготовки. На рис. 4.7 приведена классификация способов создания ремонтных заготовок.

В первом случае элементы детали обрабатывают под ремонтные размеры и в качестве припусков используют изношенные поверхностные слои материала или материал детали перемещают внутри ее объема. Другую сопрягаемую деталь изготавливают или приобретают.

Достоинство – наименьшая трудоемкость восстановления, правильная геометрическая форма восстанавливаемых элементов, не требуются мощности по нанесению восстановительных покрытий.

Недостаток – большие затраты на приобретение заменяемой детали. Или например, распределительные валы с кулачками, у которых шлифованием снят слой толщиной 2 мм, снижают мощность двигателя на 20 %, на столько же увеличивается удельный расход топлива. Результат объясняется ухудшением наполнения цилиндров за счет уменьшения «времени-сечения» открытия клапанов.

Во втором случае на восстанавливаемые элементы наносят покрытия и деталь в процессе восстановления приобретает номинальные размеры.

Соответственно – недостатки первого способа являются достоинствами второго и наоборот.

Ремонтные заготовки создают различными способами, частота применения которых представлена в таблице 3.

Ограниченно применяют пайку, заливку металлов и пластмасс.

В настоящее время наибольшее развитие получают прогрессивные способы создания ремонтных заготовок: пластическое деформирование материала, электроэрозионная, электронно-лучевая и лазерная обработка, ионно-

плазменное напыление и др.

Материал восстанавливаемого элемента детали совпадает с материалом основы в случае принудительного перемещения материала в зону износа или при обработке под ремонтные размеры (без нанесения покрытия). В других случаях материал восстанавливаемой поверхности, как правило, не совпадает с материалом основы.

Как видно, наиболее часто применяется механизированная наплавка. При наплавке применяют различные источники тепла для нагрева наносимых материалов и детали. По значению удельной мощности вложенного тепла в единицу восстанавливаемой поверхности ($10^2 \dots 10^{14}$ Вт/см²) источники тепла располагаются в такой последовательности: газовое пламя – электрическая дуга – ТВЧ – плазма – электронный луч – лазер.

В зависимости от способа нагрева наносимого материала существуют основные виды наплавки: электродуговая (электрической свободной дугой), плазменная (электрической сжатой дугой), электрошлаковая (теплом шлака за счет прохождения электрического тока), электромагнитная (теплом электрического тока, проходящего через соприкасающиеся металлические частицы, удерживаемые над восстанавливаемой поверхностью силами магнитного поля), индукционная (теплом вихревых токов в материале детали), намораживанием (теплом расплава), электроннолучевая (энергией ускоренных электронов), лазерная (энергией видимого излучения), ионно-плазменная (энергией движущихся ионов), газовая (теплом сгораемой смеси газов).

Дуговую наплавку по расположению сварочного шва относительно оси детали подразделяют на винтовую и широкослойную.

В зависимости от вида присадочного материала различают наплавку: компактной проволокой, порошковой проволокой, лентой, по оболочке, электромагнитной шихтой и проволокой, порошками.

По виду защиты сварочной ванны от влияния атмосферного воздуха наплавка бывает: без защиты, под слоем флюса, в среде защитных газов, самозащитной проволокой.

По степени автоматизации наплавку делят на ручную, полуавтоматическую и автоматическую.

Газопламенное напыление бывает: электродуговое, газопламенное, детонационное и плазменное. Плазменное напыление, в свою очередь, подразделяется на индукционное и плазменно-дуговое.

По виду защиты рабочей зоны напыления различают его виды: без защиты, с местной защитой и в герметичной камере.

Процессы создания припусков с применением ДРД классифицируют по способам закрепления ДРД и используемой при этом энергии.

Наименее изучены комбинированные способы создания припусков на ремонтных заготовках.

Работоспособность покрытий оценивается такими основными критериями: прочностью соединения их с основой, сохранением или повышением усталостной прочности элементов детали и износостойкостью поверхностей.

Выбор способа создания ремонтной заготовки определяет как тру-

доемкость процесса восстановления детали, расход материалов и энергии, так и последующую надежность восстановленной детали.

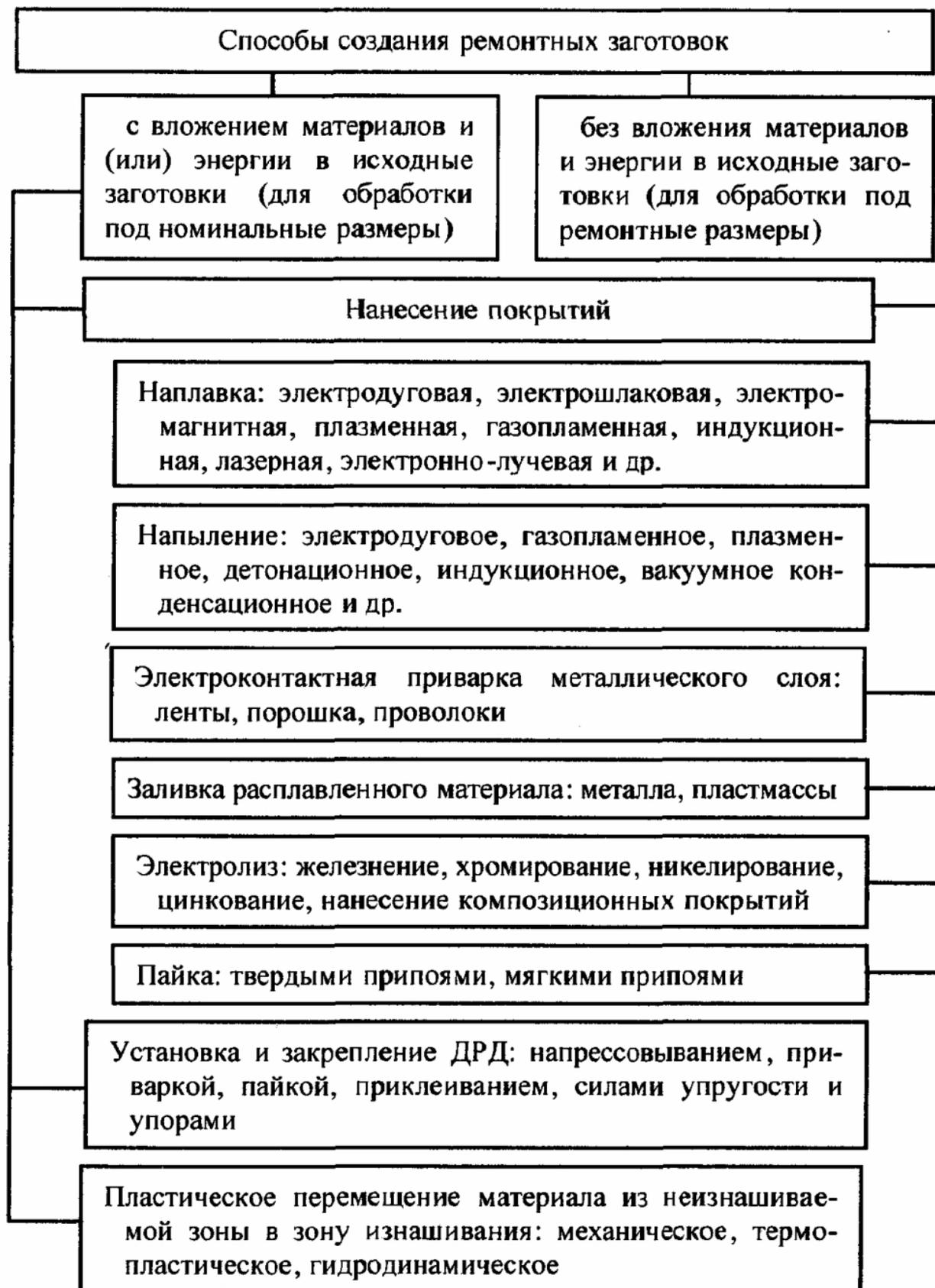


Рис. 4.7. Классификация способов создания ремонтных заготовок

Таблица 3

Частота применения способов создания ремонтных заготовок
от общего объема работ

Способ создания ремонтных заготовок	Частота, %
Наплавка (электродуговая, газопламенная, плазменная)	60...80
Напыление	6...12
Нанесение гальванических покрытий	4...7
Электроконтактная приварка металлического слоя	3...7
Нанесение полимерных покрытий	2...6
Пластическое деформирование	1...2

5. МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

5.1. Наплавка покрытий

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.

Если в машиностроительном производстве наплавку применяют для повышения износостойкости трущихся поверхностей, то в ремонтном производстве – в основном для проведения последующих работ по восстановлению расположения, формы и размеров изношенных элементов. Наплавка изношенных поверхностей занимает ведущее место вследствие своей универсальности.

Наиболее распространены в ремонте способы электродуговой наплавки (табл. 4). По сравнению с другими они дают возможность получать слои с высокой производительностью практически любой толщины, различного химического состава и с высокими физико-механическими свойствами. Наплавочные покрытия наносят на цилиндрические поверхности диаметром > 12 мм.

Таблица 4

Основные показатели способов наплавки

Способ	Толщина слоя, мм	Производительность, кг/ч	Прочность соединения, МПа
Электродуговая самозащитной проволокой	0,5...3,5	1,0...3,0	450
Электродуговая под слоем флюса	1,0...5,0	0,3...3,0	550
Электродуговая в среде диоксида углерода	0,5... 3,5	1,5...4,5	
Электродуговая в среде аргона	0,5.. 2,5	0,3...3,6	450
Вибродуговая	0,5... 1,5	0,3... 1,5	400
Газопламенная	0,5.. 3,5	0,15...2,0	480
Плазменная (порошковая)	0,5...5,0	1...12	490

Перед наплавкой очищают и прокаливают наплавочные материалы для удаления влаги. Последняя может быть источником водорода. Вследствие водородной хрупкости возникают холодные трещины. Далее обрабатывают поверхности деталей и электродов и при необходимости предварительно нагревают их.

Применяются растворы технологических моющих средств, 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.

Электродуговая наплавка классифицируется по:

- 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 наплавляемого металла (покрытием электрода, флюсом, электродным материалом, комбинированный).

При электродуговой наплавке дуга может гореть между электродом и изделием или между электродами. Полярность может быть прямая («+» на детали) или обратная.

При наплавке между покрытием и основой образуется металлическая связь, поэтому особое значение имеет свариваемость материалов (свойство создавать прочное сварное соединение без трещин, пор и других дефектов).

Материал детали, прилегающей к наплавленному слою, характеризуется максимальной твердостью и склонностью к образованию трещин замедленного разрушения. Для предотвращения трещинообразования применяют следующие меры:

- предварительный и сопутствующий подогрев во время наплавки для поддержания заданной температуры основного металла;
- наплавку после удаления с поверхности детали слоя, содержащего дефекты или отличающейся повышенной твердостью;
- подогрев изделия после наплавки и замедленное охлаждение наплавленного металла;
- последующую термическую обработку;
- наплавку эластичного подслоя на поверхность основного металла, обладающего удовлетворительной свариваемостью;
- уменьшение числа слоев при многослойной износостойкой наплавке;
- выбор для износостойкой наплавки способов, при использовании которых возникают меньшие термические напряжения в изделиях;
- выбор наплавочного материала для первого слоя коррозионно-стойкой наплавки с учетом влияния основного металла на состав наплавленного слоя.

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.

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. Требуется высокая квалификация сварщиков, потому что наплавку необходимо вести на минимально возможных токе и напряжении с целью уменьшения доли основного металла в наплавленном слое, при этом необходимо обеспечить сплавление основного и наплавленного металлов.

Температуру предварительного подогрева деталей при дуговой наплавке покрытыми электродами выбирают из табл. 5.

Таблица 5

Температура предварительного подогрева деталей при дуговой наплавке покрытыми электродами в зависимости от вида наплавочного материала

Наплавочный материал	Температура предварительного подогрева, К
Материалы для износостойкой наплавки: - стеллит - перлитная сталь - мартенситная сталь - марганцовистая аустенитная сталь - высокохромистые на основе железа - карбид вольфрама	573...773 423 423 Не подогревают 423 573
Коррозионно-стойкая сталь: - аустенитная - ферритная	Не подогревают 373...673
Никель и его сплавы: - никель - инконель - монель-металл	Не подогревают 393 373
Медь и ее сплавы: - медь - бронза - медно-никелевый сплав	553...873 Не подогревают 423

Сущность электродуговой наплавки под слоем флюса в том, что сварочная дуга горит между голым 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. 5.1). К детали и электроду прикладывают электрическое напряжение. При электродуговой наплавке под слоем флюса применяют постоянный ток обратной полярности. При наплавке цилиндрических поверхностей электрод смещают с зенита в сторону, противоположную вращению. Величина смещения составляет -10% диаметра наплаваемой детали. Электрод должен составлять угол с нормалью к поверхности 6...8°. Флюс в зону наплавки подают из бункера. Расход флюса и, соответственно, толщину его слоя на поверхности детали регулируют открытием шибера. После зажигания дуги одно-

временно 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.

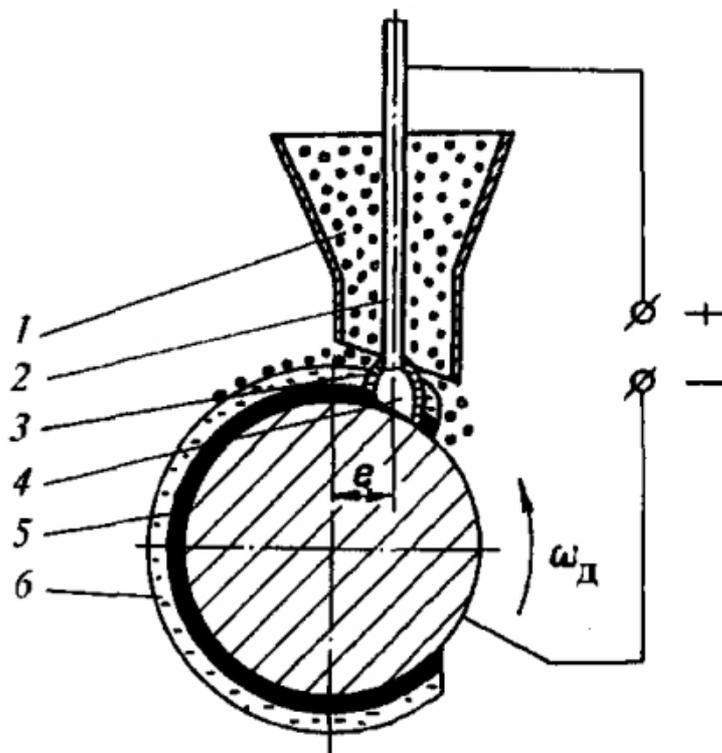


Рис. 5.1. Схема наплавки под слоем флюса: 1 – бункер с флюсом; 2 – электрод; 3 – оболочка расплавленного флюса; 4 – газопаровой пузырь; 5 – наплавленный слой; 6 – шлаковая корка; ϵ – величина смещения электрода с зенита; $\omega_{Д}$ – угловая частота вращения детали

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 расплавленного 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.

Флюс при наплавке покрытий осуществляет следующие функции:

- 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 лежащим 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/мм² 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. 5.2). Блуждающая дуга горит между деталью и ближайшим к ней электродом.

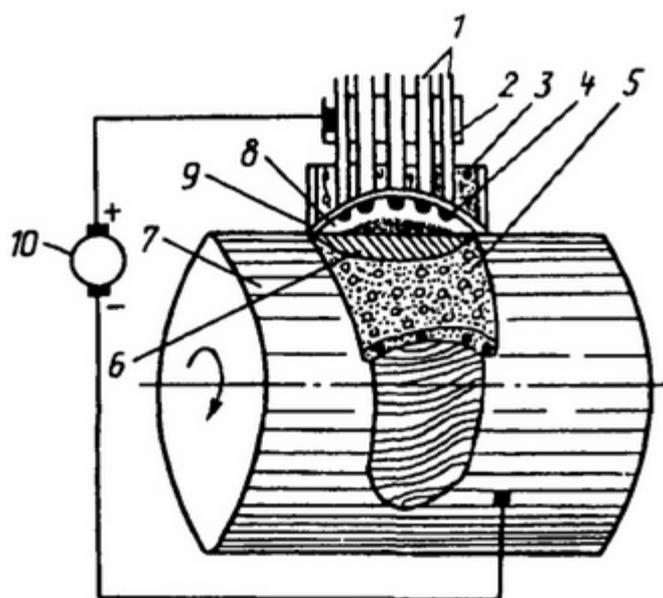


Рис. 5.2. Многоэлектродная наплавка под слоем флюса:

- 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

Механизированная 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. Наплавляют 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 про-

цессов;

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

Недостатки:

- большое вложение тепла в материал детали, что увеличивает зону термического влияния и изменяет результаты предыдущей термической обработки. После наплавки обычно требуется последующая термическая обработка, хотя применение керамического флюса ее исключает;
- трудности удержания ванны расплавленного металла на поверхности цилиндрической детали и необходимость удаления шлаковой корки. По первой причине детали диаметром < 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 человека.

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. 5.3). Ток, проходящий от электрода через жидкий шлак к детали, выделяет тепло, достаточное для плавления шлака и электродного металла.

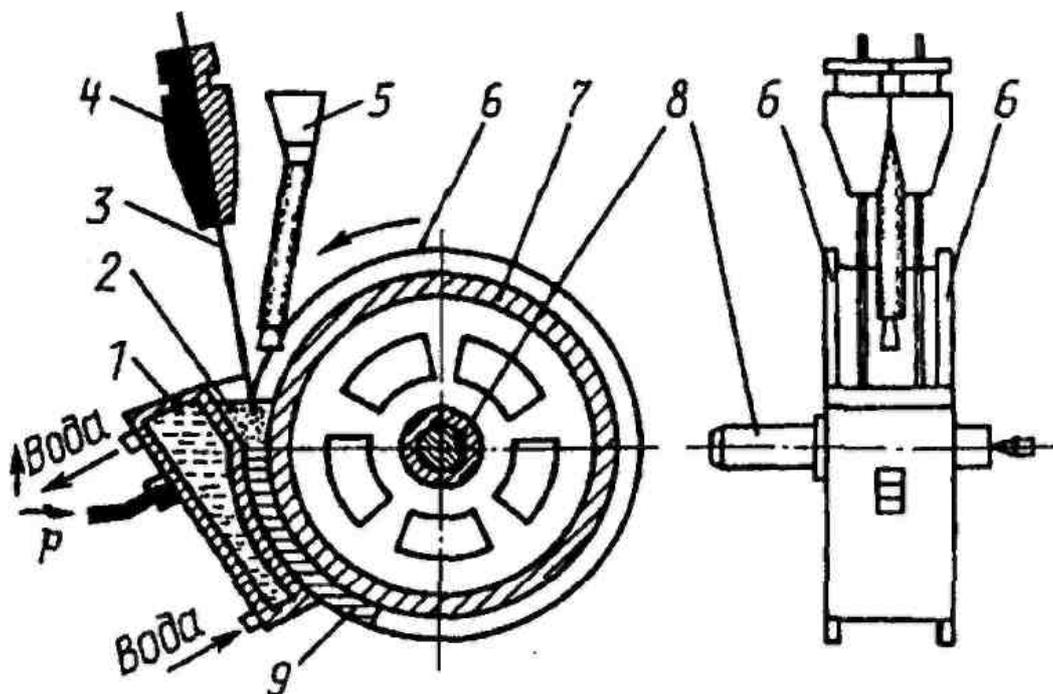


Рис. 5.3. Схема электрошлаковой наплавки: 1 – кристаллизатор; 2 – шлаковая ванна; 3 – электрод; 4 – мундштук; 5 – дозатор легирующих добавок; 6 – крупногабаритные диски; 7 – восстанавливаемая деталь; 8 – оправка; 9 – покрытие

Возможная толщина слоя наплавки > 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 > 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.

Процесс наплавки начинают на технологической пластине, которую затем удаляют. В ванну помещают флюс и электрод. Зажигают дугу между электродом и технологической пластиной, в результате чего расплавляется флюс, образуя жидкую ванну. После образования шлаковой ванны дуга гаснет, ток проходит через жидкий шлак и начинается бездуговой процесс. Включают подачу электродной проволоки, открывают дозатор с флюсом и сообщают движение детали. Под воздействием высокой температуры шлак оплавляет поверхность детали и электрода. Температура шлаковой ванны выше, чем температура плавления присадочного электродного материала. Присадочный металл после расплавления оседает и формирует с помощью охлаждаемого кристаллизатора нужную форму покрытия.

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.

Недостатками процесса являются невозможность получения покрытий толщиной < 10 мм, а также высокое содержание основного металла в покрытии.

Сущность **наплавки в среде защитного газа** состоит в том, что 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. 5.4).

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.

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 м³/ч.

Автоматическая наплавка в среде диоксида углерода 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 большая экономичность.

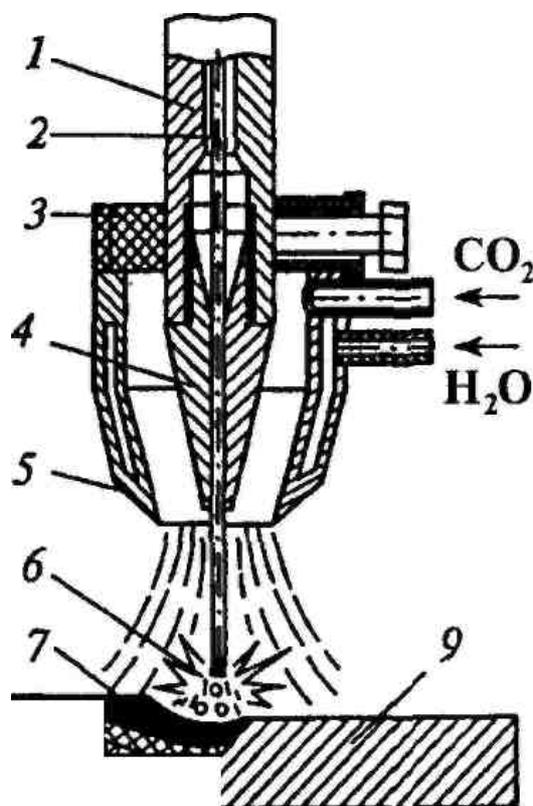


Рис. 5.4. Схема наплавки в среде диоксида углерода: 1 – мундштук; 2 – электродная проволока; 3 – горелка; 4 – наконечник; 5 – сопло горелки; 6 – электрическая дуга; 7 – сварочная ванна; 8 – покрытие; 9 – восстанавливаемая деталь

При наплавке 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 наплавляемого материала.

Вибродуговая наплавка (рис. 5.5) отличается 3 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 наплавляемой поверхности.

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

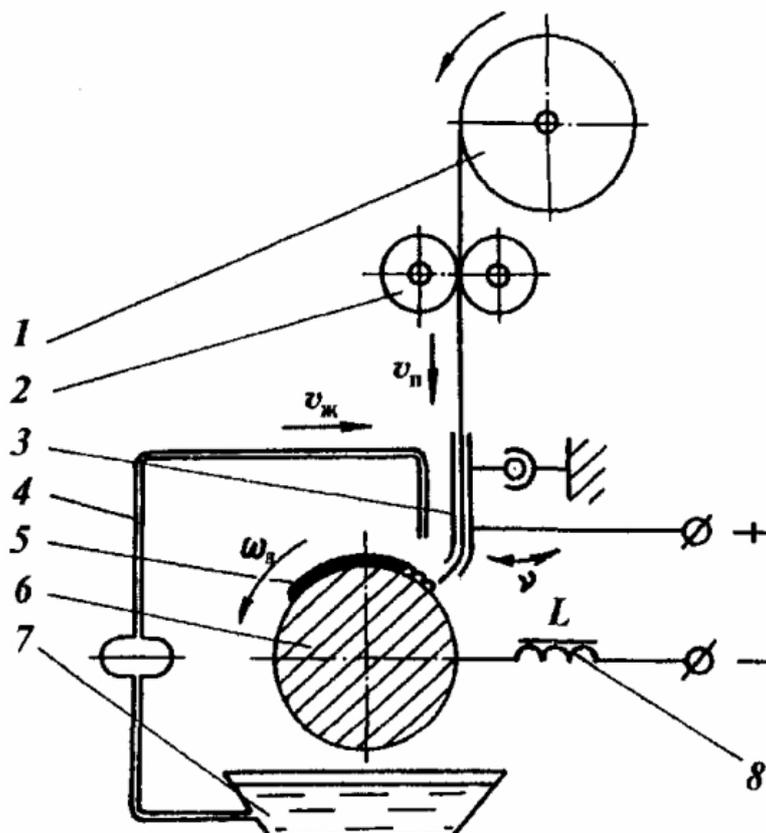


Рис. 5.5. Схема вибродуговой наплавки: 1 – кассета для проволоки; 2 – подающие ролики; 3 – качающийся мундштук; 4 – система подачи раствора; 5 – наплавленный слой; 6 – восстанавливаемая деталь; 7 – емкость; 8 – индуктивное сопротивление; v_p и $v_{ж}$ – скорость подачи соответственно проволоки и раствора; ω_d – угловая частота вращения детали; ν – частота качаний мундштука; L – индуктивность

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.

Недостатки:

-охлаждение наплавляемой поверхности с высокой скоростью дает неодинаковую твердость участков поверхности, 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.

Импульсно-дуговая наплавка – разновидность электродуговой наплавки. В этом случае на основной сварочный ток непрерывно горячей 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.

Плазменная наплавка – это процесс нанесения покрытий плазменной струей, когда деталь включена в цепь тока нагрузки. В этом случае с помощью плазменной струи нагреваются поверхность восстанавливаемой детали и наносимый материал. Материал перемещается плазменной струей. Температура ее может превышать 20 000 К.

При плазменной наплавке в отличие от аргонодуговой наплавки электрическая дуга сжимается стенками водоохлаждаемого сопла. Газ, продуваемый сквозь эту дугу, приобретает свойства плазмы – становится ионизированным и электропроводящим. Слой газа, соприкасающийся со стенками сопла, интенсивно охлаждается, утрачивает электропроводность и выполняет функции электрической и тепловой изоляции, что приводит к уменьшению диаметра плазменной струи, который составляет 0,7 диаметра сопла.

В качестве плазмообразующего газа чаще применяется аргон.

Плотность энергии высока и скорость ввода тепла в деталь больше скорости теплопередачи в ее массу, поэтому поверхность детали быстро расплавляется. Процесс протекает с малым проплавлением и большим термическим КПД.

Преимущества:

- 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 %.

- 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.

Применяется для ответственных деталей: коленчатые, кулачковые и распределительные валы, валы турбокомпрессоров, оси, крестовины карданных шарниров, направляющие оборудования и др.

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

Сущность **электромагнитной наплавки** заключается в нанесении 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 процесса – восстановление и упрочнение деталей с износом до 0,6 мм в мелко- и среднесерийном производствах с одновременным их поверхностным пластическим деформированием.

При **лазерной наплавке** источником тепла является концентрированный луч лазера.

Лазерная наплавка 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 для подложки из стали и 45...60 HRC для подложки из чугуна. Толщина нанесенного слоя достигает 40...50 мкм. Прочность соединения покрытия с материалом подложки > 250 МПа.

Сущность **электронно-лучевой наплавки** заключается в нагреве 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.

Технология **индукционной наплавки** 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.

Преимущества процесса:

- 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 процесса:

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

Наплавка намораживанием заключается в последовательном затвердевании 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 наплаваемой 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 заго-

товки затвердевает слой сплава толщиной 2,5...3,0 мм. Затем деталь охлаждают на воздухе.

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.

Технология **ручной газопорошковой наплавки** включает такие операции:

- равномерный нагрев восстанавливаемой поверхности нейтральным пламенем горелки до температуры 300...400°C 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 частиц. 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.

5.2. Электроконтактная приварка

Сущность **электроконтактной приварки** состоит в закреплении металлического слоя его на изношенной поверхности мощными импульсами тока с приложением давления (рис. 5.6).

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. Количество выделившегося тепла (Дж) при этом равно

$$Q = kI^2Rt, \quad (7)$$

где k – коэффициент пропорциональности; I – ток, А; R – сопротивление участка цепи, Ом; t – время действия тока, с.

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. Перекрывания 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 заковки приваренного слоя в зону приварки подают охлаждающую жидкость.

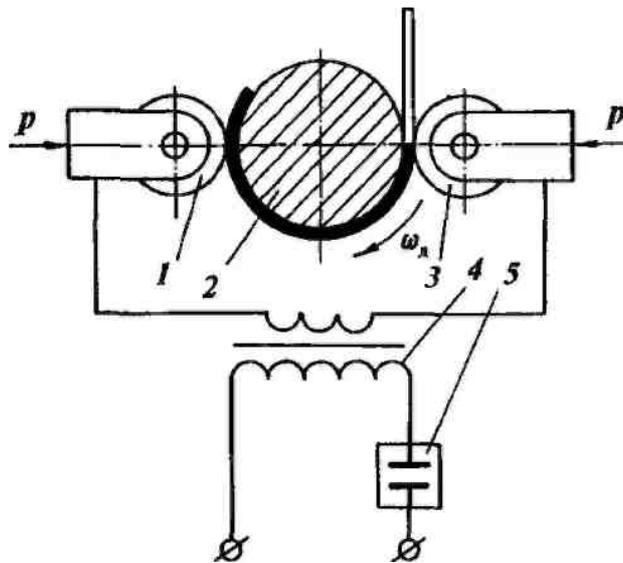


Рис. 5.6. Схема электроконтактной приварки ленты: 1 и 3 – ролики; 2 – восстанавливаемая деталь; 4 – трансформатор; 5 – контактор

Сущность электроконтактной приварки порошковых материалов заключается в том, что между движущимися деталью и электродом помещают металлический порошок, через них пропускают электрический ток с применением давления. Разновидности представлены на рис. 5.7.

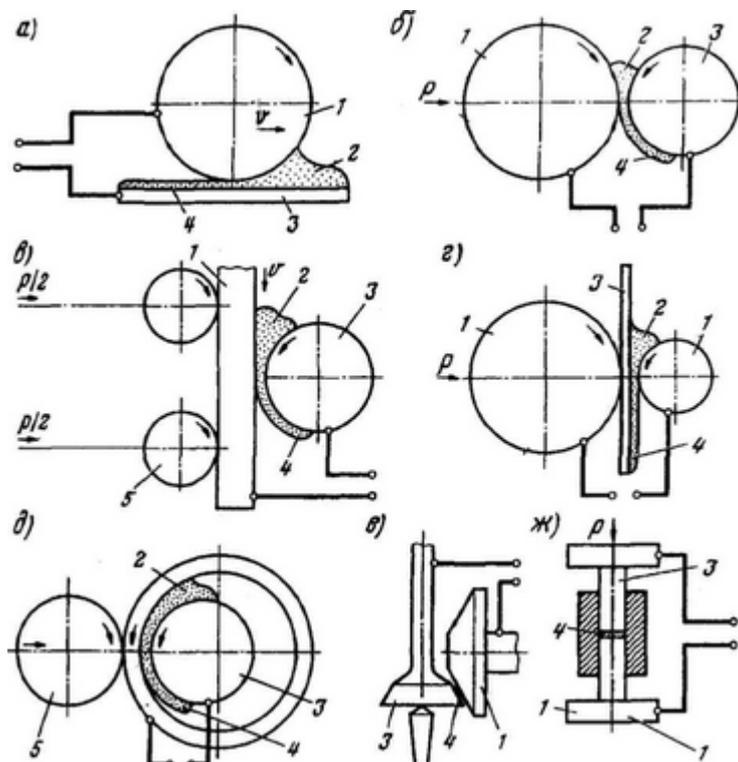


Рис. 5.7. Схема электроконтактной приварки порошков на поверхности: а – плоскую (горизонтальная схема); б – наружную цилиндрическую; в – наружную цилиндрическую плоским электродом; г – плоскую (вертикальная схема); д – наружную цилиндрическую; е – коническую; ж – торцовую; 1 – электрод;

2 – порошок; 3 -деталь; 4 – слой порошка; 5 – нажимной ролик

Вращающаяся или неподвижная деталь является одним из электродов переменного тока, второй медный электрод вращается или неподвижен. В зазор между этими двумя 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/см², напряжением 6...12 В и импульсами длительностью 0,04...0,14 с. Скорость приварки составляет 0,17...0,37 м/мин.

5.3. Напыление материала

Напыление материала заключается в нагреве материала, его диспергировании (дроблении), переносе движущейся средой, ударе о восстанавливаемую поверхность или покрытие, деформировании и закреплении (рис. 5.8).

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

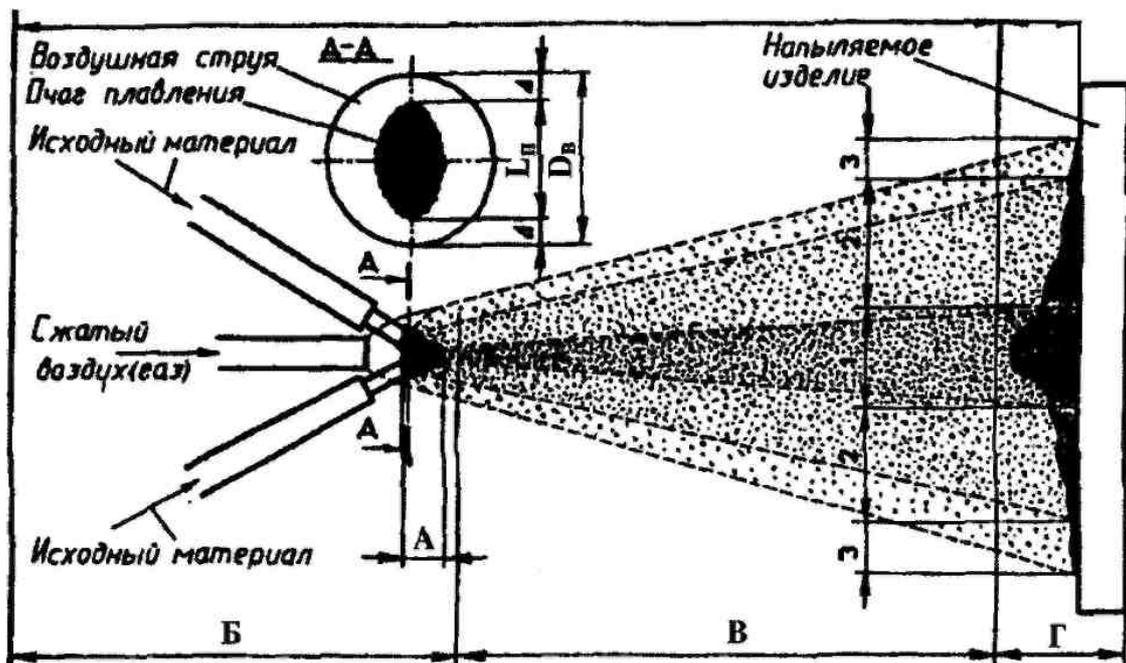


Рис. 5.8. Схема процесса напыления: А – зона расплавления материала; Б – зона распыления; В – факел; Г – зона образования покрытия; 1,3 – пятно насыщения соответственно максимального и минимального; 2 – кольцо среднего насыщения; D_в – диаметр воздушной струи; L_п – размер очага плавления; А – перекрытие

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 ок-

сидной пленки. Характеристики видов напыления приведены в табл. 6.

Таблица 6

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 основной (адгезия), 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

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

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.

Техпроцесс напыления включает:

- предварительную обработку наносимого материала;
- предварительную мех. 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.

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

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. 5.9).

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 меньшие затраты на нанесение 1 кг покрытия, чем при электродуговой наплавке.

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.

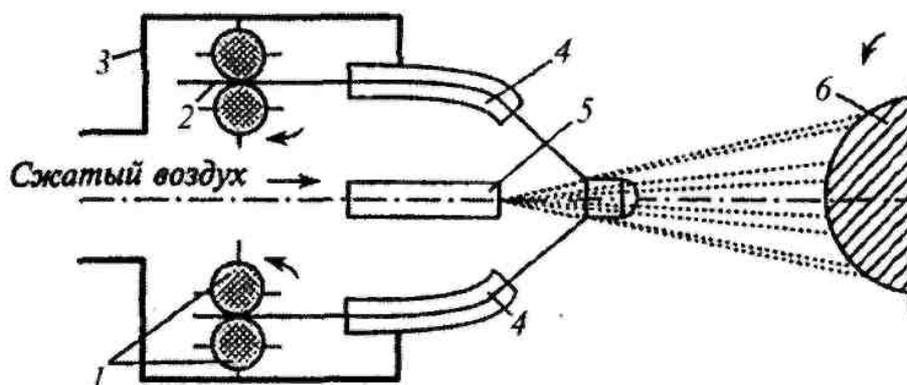


Рис. 5.9. Схема аппарата для электродугового напыления: 1 – подающие ролики; 2 – проволока; 3 – электрические провода; 4 – направляющие наконечника; 5 – сопло; 6 – восстанавливаемая деталь

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

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 $> 350^{\circ}\text{C}$ 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.

Плазменное напыление основано на использовании энергии плазменной струи как для нагрева, так и для переноса частиц металла. Плазменную струю получают путем продувания плазмообразующего газа сквозь электрическую дугу и обжатия стенками медного водоохлаждаемого сопла (рис. 5.10).

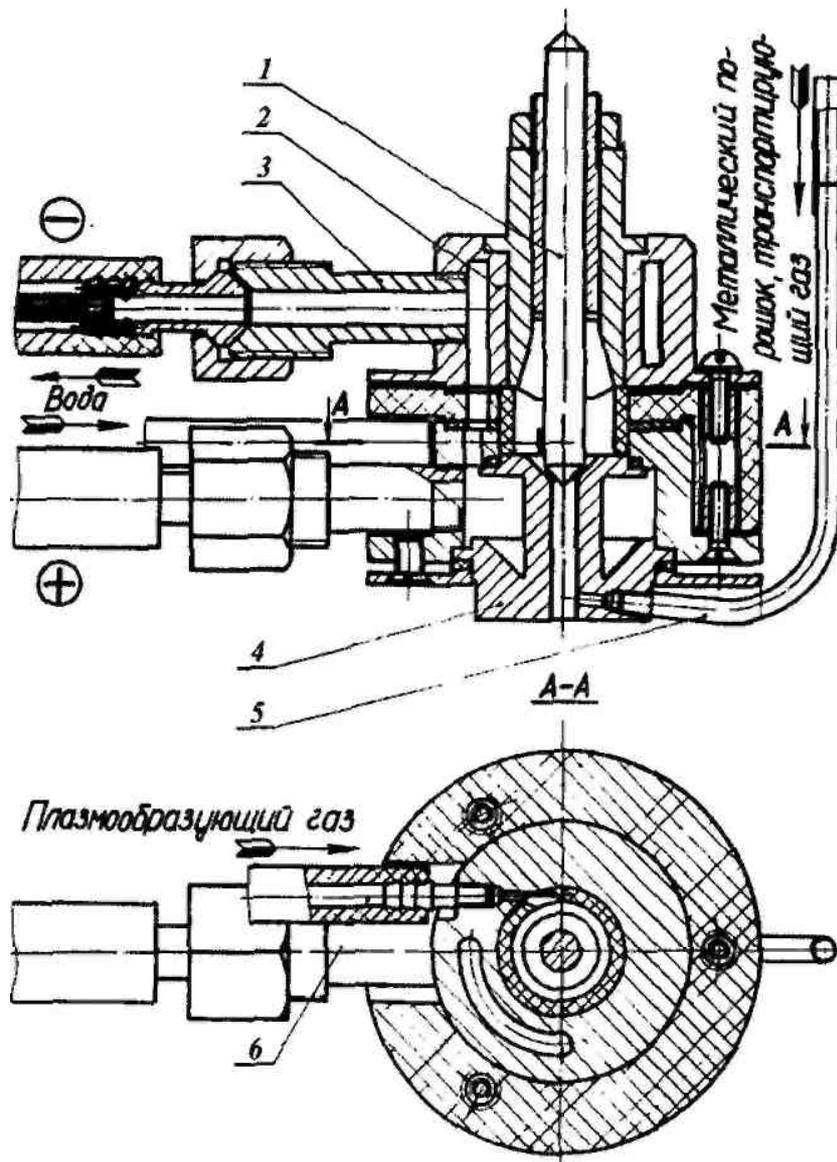


Рис. 5.10. Плазменная горелка для напыления порошкового материала

Порошкообразный материал подают питателем с помощью транспортирующего газа. 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.

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

При **детонационном напылении** 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. Покртия имеют малую пористость (до 0,5 %) и высокую прочность соединения с под-

ложкой (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. 5.11).

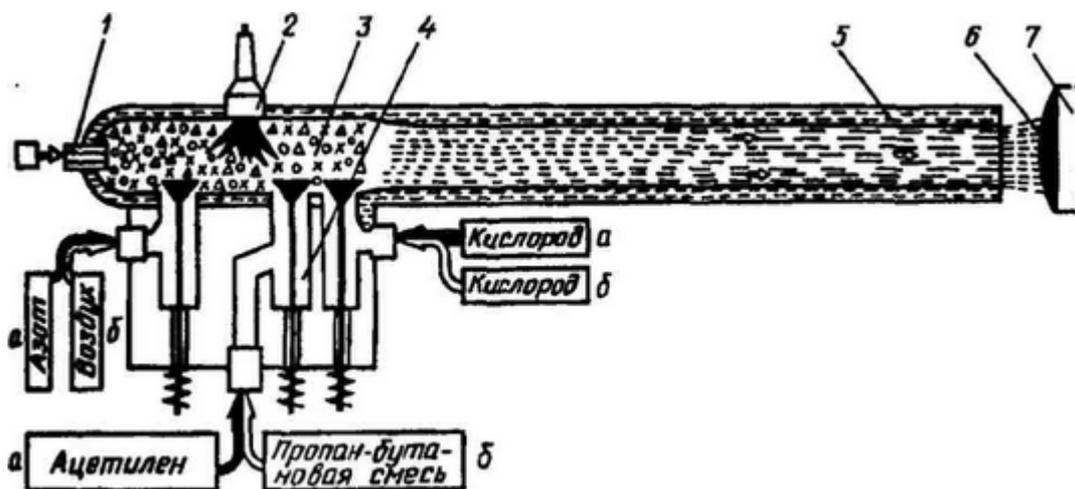


Рис. 5.11. Схема установки для детонационного напыления:

- а – базовой; б – усовершенствованной; 1 – порошковый питатель; 2 – запальное устройство; 3 – взрывная камера; 4 – смесительная камера; 5 – водоохлаждаемый ствол; 6 – покрытие; 7 – восстанавливаемая деталь

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.

При **индукционном напылении** 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. 5.12) имеет высокочастотный индуктор и концентратор тока, который обеспечивает нагрев проволоки на небольшом участке. Частота тока f (Гц), необходимого для расплавления проволоки.

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

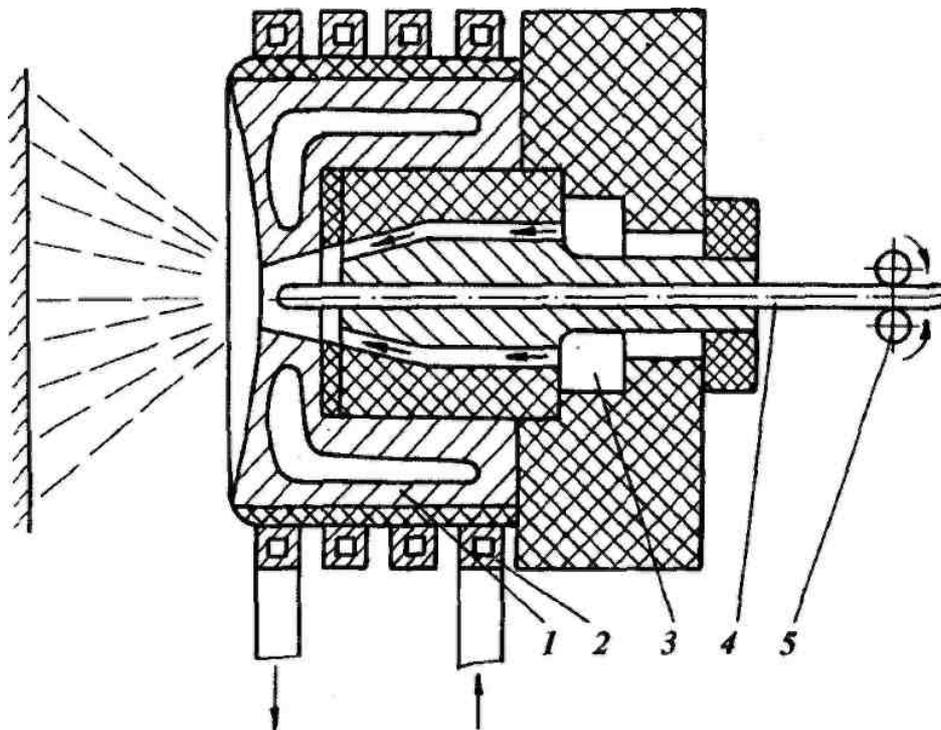


Рис. 5.12. Устройство для индукционного напыления: 1 – концентратор тока; 2 – индуктор; 3 – воздушный канал; 4 – проволока; 5 – подающие ролики

5.4. 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 такими 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 толщин 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.

Т.е. копирование технологии механической обработки деталей при изготовлении машин для их восстановления не дает оптимальных результатов.

5.4.1. Лезвийная обработка

Заготовки с покрытиями обрабатывают точением (в том числе ротационным инструментом), фрезерованием, строганием и сверлением.

Точением и фрезерованием обычно обрабатывают относительно пластичные покрытия из малоуглеродистых сталей, алюминия, меди и их сплавов, а также из самофлюсующихся сплавов твердостью до 45 HRC. При обработке резанием необходимо обеспечить срезание частиц без их выкрашивания. Напыленные покрытия во время механической обработки не следует нагружать растяжением, изгибом или отрывом.

Лезвийная обработка покрытий из высоколегированных, нержавеющей сталей и самофлюсующихся сплавов выполняется резцами из быстрорежущих сталей или твердых сплавов в том случае, когда припуск на обработку $> 0,25$ мм на сторону и твердость монолитного материала < 3000 МПа (35...45 HRC). Механическую лезвийную обработку наплавленных и напыленных покрытий с твердостью до 35 HRC выполняют в несколько ходов. Скорость резания при черновом точении уменьшают на 30...60 %, а при чистовом на 20...40 % по сравнению со скоростью обработки нормализованной стали 45.

Выбор лезвийного инструмента для восстановительных покрытий ведут в 3 этапа.

На 1-м определяют отношение твердости инструментального и обрабатываемого материалов при рабочей температуре резания. Полагают, что при обработке покрытий инструментом из твердых сплавов эта температура равна 800°C , а сверхтвердыми материалами 1000°C . Выбирают тот инструментальный материал, который обеспечивает наибольшее отношение твердости.

На 2-м оценивают износостойкость режущего инструмента.

На 3-ем проводят экспериментальную проверку полученных результатов.

5.4.2. Абразивная обработка

Абразивную обработку применяют, если твердость ремонтной заготовки не позволяет применить лезвийную обработку или необходимо получить высокую точность детали с малой шероховатостью поверхностей.

Шлифование – основной способ обработки износостойких покрытий высокой твердости. Некоторые покрытия могут быть эффективно обработаны только шлифованием.

Соответственно, применяют материалы, состоящие из зерен, обладающих высокой твердостью и режущей способностью.

Зерна шлифующих материалов имеют острые грани и при шлифовании, разрушаясь, образуют осколки с острыми гранями, тем самым самозатачиваются.

Суперфиниширование и полирование – процессы удаления разупрочненного на предыдущих операциях тонкого слоя и достижения необходимой шероховатости поверхности. Процесс суперфиниширования цилиндрических шеек протекает при вращении детали и осциллирующем движении мелкозернистых брусков вдоль оси шпинделя. Давление брусков на поверхность обработки < 3 МПа, оно уменьшается к завершению операции.

Зерна полирующих материалов округлой формы, что способствует выравниванию обрабатываемой поверхности.

Притирка – процесс совместной обработки деталей, работающих в паре, для получения плотного контакта рабочих поверхностей. Притирают, например, клапаны двигателей к седлам.

Обработка происходит при относительном возвратно-вращательном или поступательном движении притираемых деталей. В зону обработки подают зерна электрокорунда, карбида кремния, карбида титана, карборунда или алмазную пасту в индустриальном масле. Чтобы следы резания не налагались друг на друга, необходимо каждый последующий ход притирки начинать с нового относительного положения притираемых деталей. Эту функцию выполняет механизм углового смещения приводных шпинделей.

Хонингование – процесс доводки внутренних цилиндрических поверхностей абразивными брусками, которые закреплены в головке и вращаются с одновременным возвратно-поступательным движением. В процессе хонингования бруски постоянно прижимаются к поверхности детали с давлением 0,05...1,4 МПа. Хонингование дает возможность получать поверхность с точностью 5-6 квалитета и шероховатостью до 0,16 мкм. Погрешность обработанного отверстия 0,005...0,02 мм, а отклонения от круглости и конусности < 0,005 мм.

Для уменьшения припусков на механическую обработку применяют **высокотемпературное уплотнение (упрочнение) напыленных покрытий**. Оно заключается в приложении давления в процессе локального нагрева. При этом уменьшаются или вообще исчезают трещины и поры.

5.5. Использование дополнительных ремонтных деталей

Дополнительные ремонтные детали (ДРД) применяют для: компенсации износа поверхностей деталей или замены их поврежденных частей.

В первом случае ДРД устанавливают и закрепляют непосредственно на изношенной поверхности. Таким образом, восстанавливают шейки валов, отверстия под подшипники качения в картерах, отверстия с изношенной резьбой и другие элементы. В зависимости от вида восстанавливаемой поверхности ДРД имеют вид гильзы, кольца, резьбовой втулки, спирали и др.

Во втором случае может быть заменена сложная часть детали с несколькими поврежденными элементами.

ДРД применяют для восстановления под номинальные размеры деталей с большими износами. Способ позволяет устранять повреждения, трудно устранимые другими способами. Стоимость материалов при этом в несколько раз ниже, чем при использовании газотермических и наплавочных покрытий. Применяемое оборудование универсальное, а технология простая.

ДРД обычно изготавливают из того материала, из которого выполнена сама восстанавливаемая деталь. ДРД, выполняющие функции трущихся элементов, могут быть перед установкой термообработаны.

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.

Вставки, стяжки применяются для восстановления резьбовых отверстий. Наибольшему изнашиванию подвержены резьбовые отверстия в деталях из алюминиевых сплавов и чугуна. В меньшей – в стальных деталях. Чаще изношены резьбы с размерами М8, М10, М12, М14 и М16. Существующие способы восстановления резьбовых отверстий, такие как образование новой резьбы большего размера или заварка отверстий со сверлением и нарезанием резьбы имеют ограниченное применение.

Процесс восстановления поврежденного резьбового отверстия включает:

- рассверливание изношенной резьбы в детали;
- нарезание новой резьбы большего размера с тем же шагом и необходимой глубиной под вставку;
- ввертывание вставки в деталь;
- удаление технологического поводка.

Рассверливанием отверстия удаляется разрушенная или поврежденная резьба. ДРД ввинчивают в резьбовое отверстие с помощью специального инструмента за поводковый усик. Технологический поводок обламывают. Выступания вставки из детали не допускается.

5.6. Способы нанесения 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 электрическую (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.

При восстановлении деталей используют процессы получения покрытий, прочно соединенных с поверхностями деталей. Эти процессы основаны на явлениях электролитической диссоциации и электролиза.

В зависимости от видов материала наносимых покрытий гальванические процессы делятся на железнение, хромирование, цинкование, кадмирование, никелирование и др. В ремонтном производстве получили наибольшее распространение первые 3 процесса. В свою очередь, первые два процесса обеспечивают получение износостойких покрытий, а цинкование – как износостойких, так и защитных покрытий. Цинк гарантирует надежную катодную защиту стальных изделий.

В зависимости от места электролиза процессы делятся на ваннные и вневаннные, а в зависимости от температуры электролита электролиз протекает в горячих ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) или холодных электролитах.

Типовой процесс нанесения гальванических покрытий содержит три блока операций: подготовительные, осаждения металла и обработки заготовок после нанесения покрытий (рис. 5.13).

Химическим способом наносят металлические покрытия на изношенные поверхности при их восстановлении и для коррозионной защиты, а неметаллические покрытия – для защиты поверхностей от коррозии и придания им диэлектрических и декоративных свойств. При нанесении покрытий используется химическая энергия исходных компонентов.



Рис. 5.13. Типовой процесс нанесения гальванических покрытий

5.7. Микродуговое оксидирование (МДО)

Микродуговое оксидирование (МДО) основано на использовании особенностей электрохимических и микроплазменных процессов и позволяет получать на поверхности вентиляльных металлов (алюминия, титана, циркония, тантала и др.) оксидные покрытия (рис. 5.14).

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 $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$. 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:

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

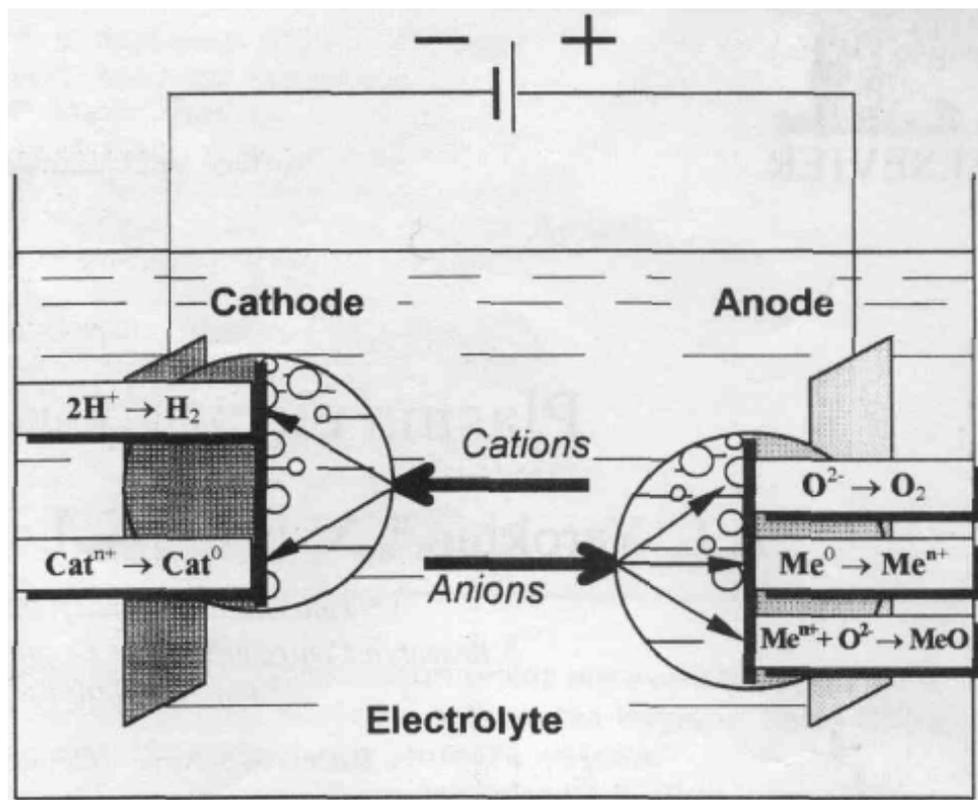


Рис. 5.14. Формирование покрытия

Наиболее перспективным оказался электролит третьего вида из щелочи КОН (0,5...3,0 г/л) и жидкого стекла Na_2SiO_3 (6...20 г/л). Температура электролита 40...50°C, его кислотность $\text{pH} = 7...12$, плотность тока 10...25 А/дм², а продолжительность процесса 1,5...2,0 ч. Анодная составляющая напряжения на 3-8 минутах должна быть ~ 200 В, а катодная – 60 В. По мере протекания процесса

анодная составляющая напряжения должна возрастать. В этом случае можно восстанавливать малоизношенные детали и упрочнять их большую номенклатуру.

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.

Механическую обработку покрытий ведут абразивным инструментом на эластичной связке.

Отличительной особенностью МДО является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микроразрядов, 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. 5.15) 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.

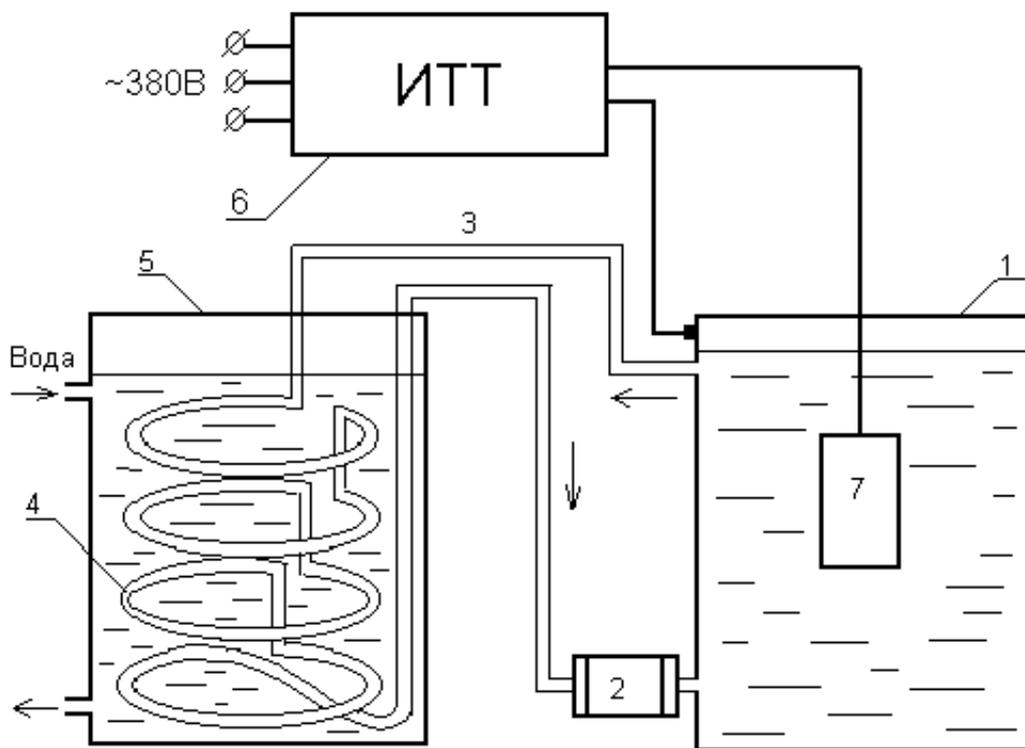


Рис. 5.15. Схема установки для МДО

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. 7.

Таблица 7

Основные физико-механические характеристики МДО-покрытий

Толщина	до 800 мкм
Адгезия покрытия	до 350 МПа
Высокая микротвердость покрытия	до 25Гпа
Удельное электросопротивление	до 2×10^{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	

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 (прочность сцепления с основным металлом);
- 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, теплоустойких, эрозионностойких, химически стойких и декоративных. В отдельных случаях появляется возможность замены деталей из нержавеющей и жаростойких сталей на детали из алюминиевых сплавов. Упрочнение стальных деталей методом МДО может быть выполнено после напыления на них алюминиевых покрытий.

5.8. Электроэрозионный синтез покрытий (ЭЭСП)

Сущность метода электроэрозионного синтеза 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. 5.16.

Источник импульсов тока 1 подключен к вибратору 2 и к паре электродов 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.



Рис. 5.16. Технологическая схема процесса ЭЭСП

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 возможно применение ППД. Основные физико-механические параметры ЭЭСП приведены в табл. 8.

Область применения:

- упрочнение поверхностей деталей, подверженных сильному износу, в том числе абразивному (пары трения, прессовый и штамповый инструмент, лопатки дробебетных машин, сопла для пескоструйной обработки, режущий инструмент и др.);
- упрочнение деталей машин на стадии их изготовления;
- восстановление размера деталей с одновременным упрочнением.

Таблица 8

Основные параметры ЭЭСП

Толщина	0,01 – 0,2
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

5.9. Пластическое деформирование материала

Применяют для восстановления расположения, формы, размеров и шероховатости поверхностей и физико-механических свойств детали за счет перемещения материала в объеме самой детали, изменения структуры материала или создания наклепа. Способ применяют для пластичных материалов (стали, меди, бронзы и др.).

Процесс уникален тем, что при восстановлении большого количества па-

раметров и свойств можно обходиться без вложения дополнительного материала в деталь в отличие от способов нанесения покрытий, установки и закрепления ДРД.

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

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. 5.17).

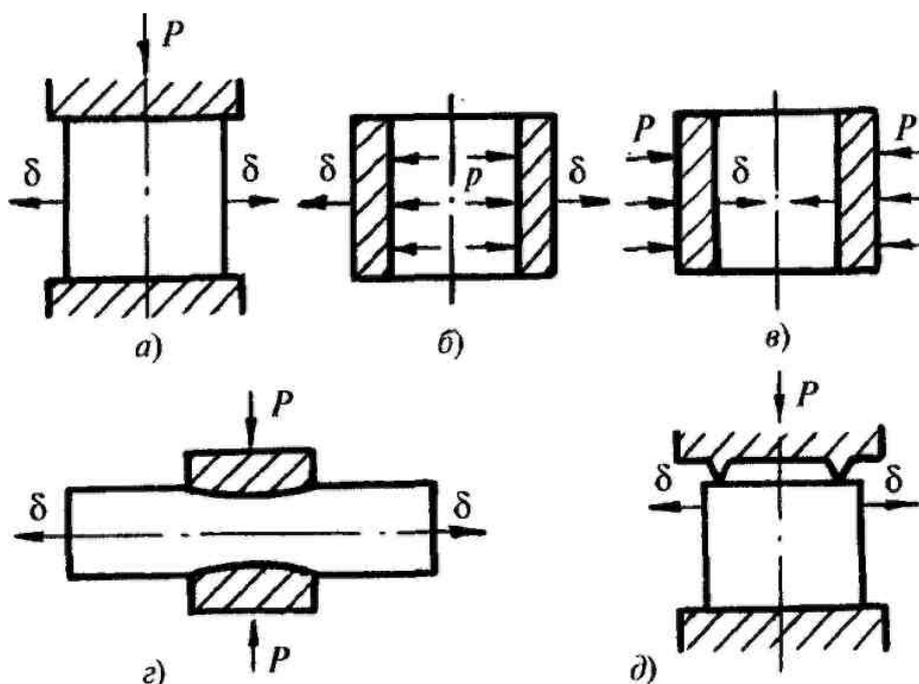
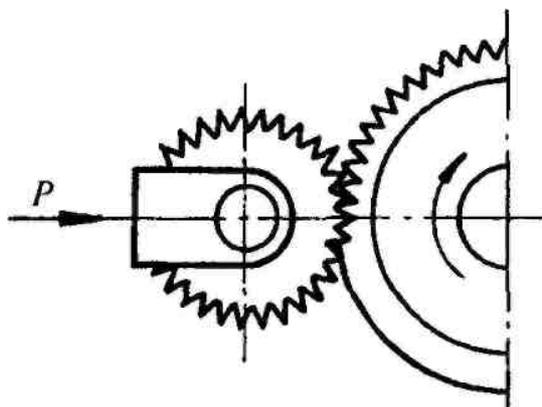


Рис. 5.17. Способы восстановления размеров деталей:
 а – осадка; б – раздача; в – обжатие; г – вытяжка; д – вдавливание

Частным случаем вдавливания является **накатка** (рис. 5.18). Поверхности накатывают специальным инструментом – зубчатым роликом (накатником) с прямыми или косыми зубьями. Применяют для деталей, которые воспринимают контактную нагрузку < 7 МПа.



5.10. Поверхностное пластическое деформирование и его виды

Объемное упрочнение повышает статическую прочность деталей, у которых рабочие напряжения распределены по сечению деталей более или менее равномерно. Для таких деталей используют высокопрочные стали и сплавы, композиционные материалы, а также применяют объемную термообработку.

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

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – это обработка деталей давлением (без снятия стружки), при которой пластически деформируется только их поверхностный слой [1-2,6].

ППД осуществляется инструментом, деформирующие элементы (ДЭ) которого (шарики, ролики или тела иной конфигурации) взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью по схемам качения, скольжения или внедрения (рис. 5.19). 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.

Метод ППД в условиях качения (рис. 5.19, а) или скольжения (рис. 5.19, 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. 5.20), характеризуемый передней внеконтактной поверхностью пластической волны (*ABC*), поверхностью контакта (*CDE*), а также задней внеконтактной поверхностью (*EF*).

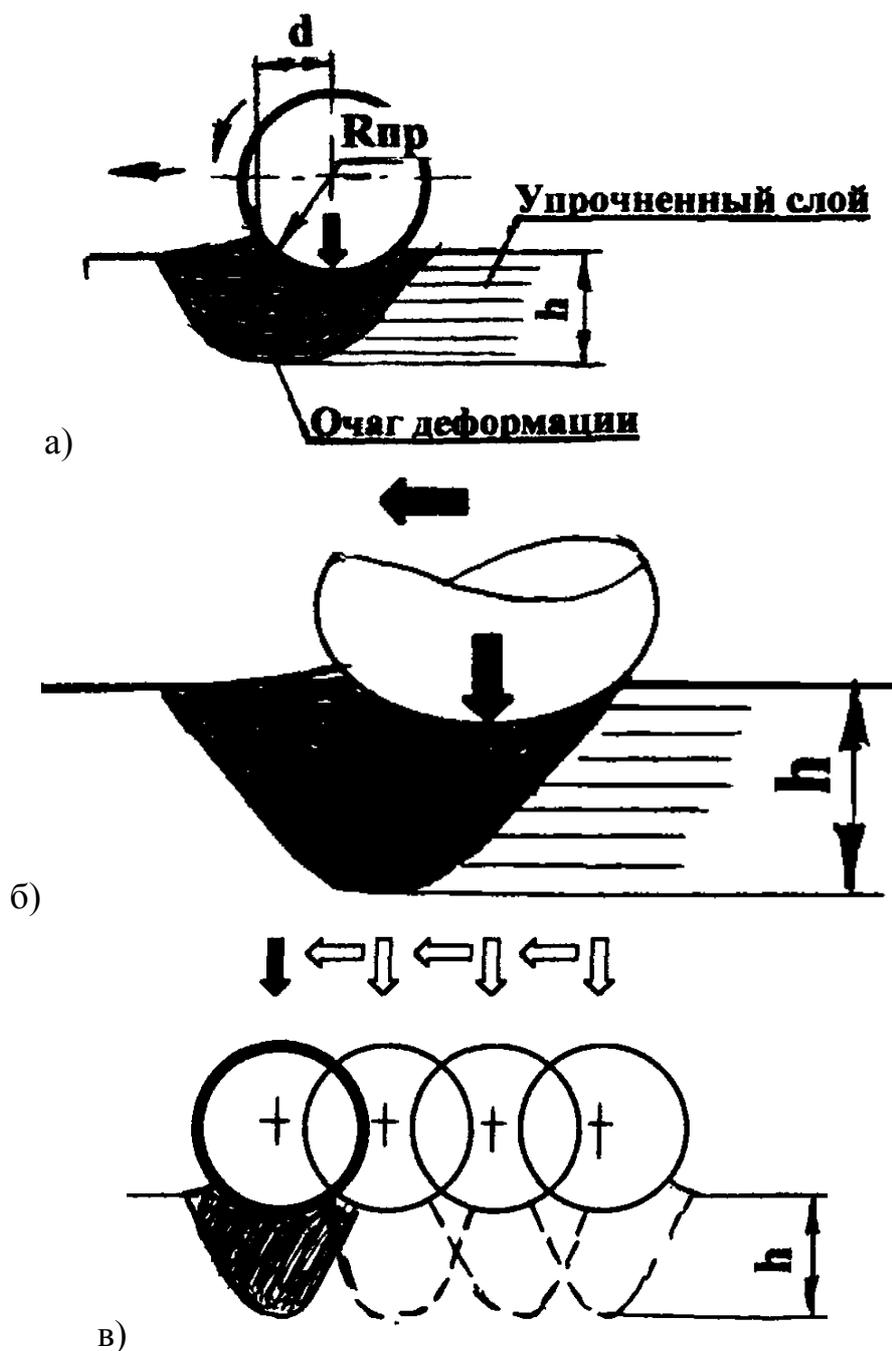


Рис. 5.19. Основные схемы взаимодействия ДЭ с обрабатываемой поверхностью: а) – качение; б) – скольжение; в) – внедрение;

Вследствие деформации частицы металла в ОД перемещаются вдоль некоторых линий тока (ЛТ), формируя упрочненный слой некоторой толщины (рис. 5.20).

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_{np} и величиной действительного внедрения ролика h_0 , в меньшей степени подачей S и скоростью обработки V .

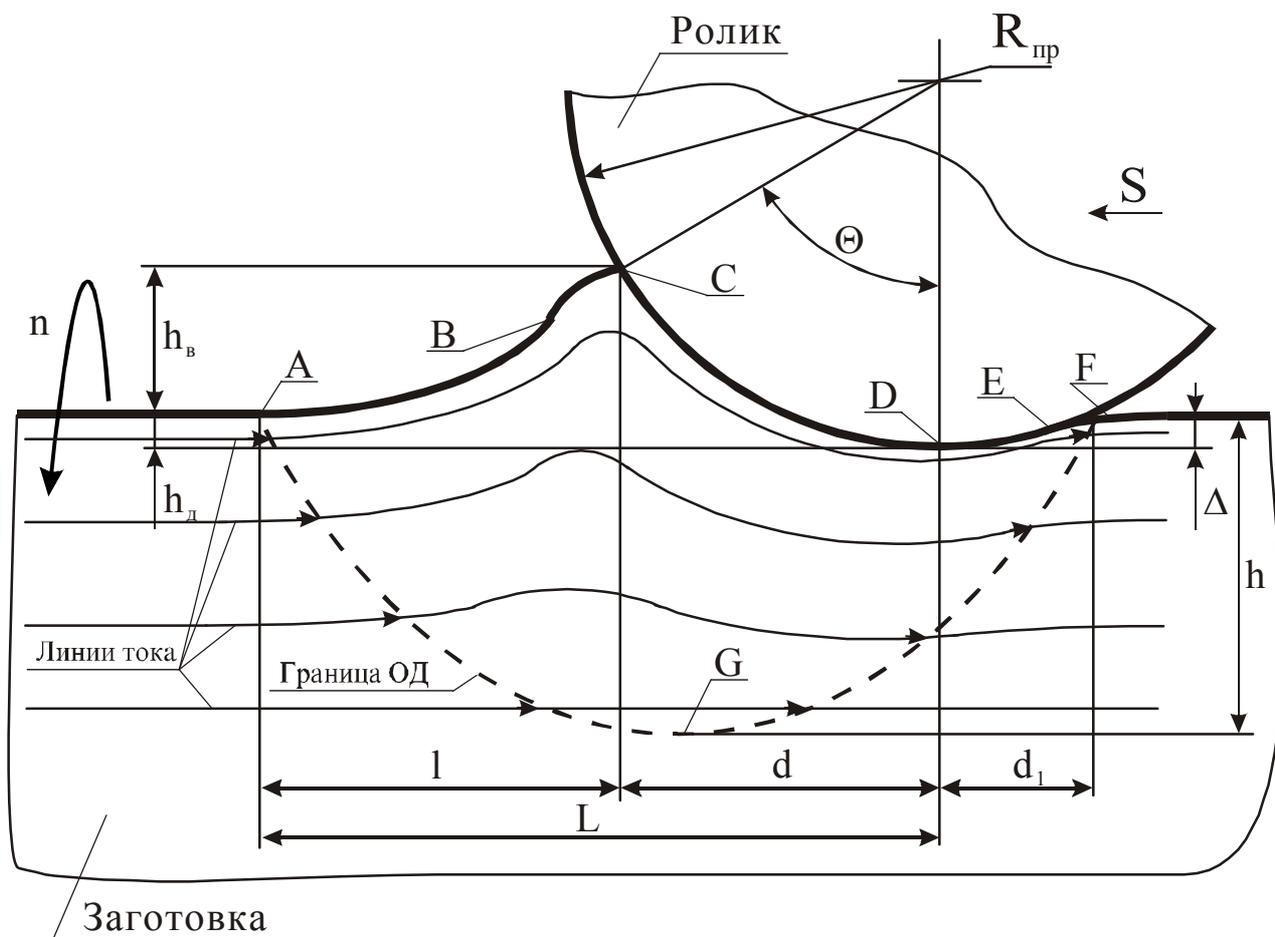


Рис. 5.20. Схема обработки ППД

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.

Известно, что величина действительного внедрения ДИ при ППД не превышает $0,05 - 0,1$ мм. При больших значениях $h_д$ полностью исчерпывается запас пластичности и происходит разрушение металла в районе вершины пластической волны (точка C на рис. 5.20) 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 восстанавливает исходную структуру металла и его механические свойства.

Для множества разновидностей ППД (статическое, ударное, вибрационное, ультразвуковое, гидравлическое, пневматическое, калибрующее и др.) об-

щим является принцип взаимодействия индентора (деформирующего инструмента) с пластическим полупространством (обрабатываемой деталью).

Анализ показал, что наиболее значимыми параметрами, влияющими на качество ПС, являются нормальное усилие P (в случае жесткой схемы – натяг h_0) и профильный радиус ролика R_{np} .

По ГОСТ 18296-72 ППД при качении инструмента (рис. 5.19, 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. 5.19, 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 раздачу цилиндра по диаметру, в связи с чем произойдет калибрование отверстия.

Указанные методы относятся к методам **статического поверхностного деформирования**. Характерным признаком является стабильность формы и размеры ОД в стационарной фазе процессе.

При **динамических (ударных)** методах инструмент внедряется в поверхностный слой детали (рис. 5.19, 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.

Достоинства:

- сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура-текстура в поверхностном слое;
- отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности частичками абразива;
- отсутствуют термические дефекты;
- имеется возможность достижения минимального параметра шероховатости поверхности как на термически необработанных сталях, цветных сплавах, так и на высокопрочных материалах, сохраняя исходную форму заготовок за один рабочий ход;
- имеется возможность образования регулярных микрорельефов 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.
- при обработке ППД в результате деформирования поверхностного слоя металла и работы трения образуется теплота, которая нагревает обрабатываемую заготовку, инструмент и рабочие тела, а также окружающую среду.

Температура: при обкатывании – до 300 – 400 °С, при выглаживании – до 600 -700 °С, при ударных методах – до 800 – 1000 °С.

Такой нагрев может вызывать термопластическое деформирование и другие явления, снижающие эффект упрочнения. Термопластическое деформирование приводит к резкому спаду остаточных сжимающих напряжений на поверхности, а в некоторых случаях – к превращению их в растягивающие. Необходимо устанавливать такие давления и скорости обработки конкретных материалов, которые не вызывают повышения температуры поверхности более допустимой.

При поверхностном пластическом деформировании **шаровым инструментом** инструмент можно классифицировать по следующим признакам:

1. По характеру обрабатываемых поверхностей: для наружных цилиндри-

ческих, 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.

Диапазон режимов ППД приведен в таблице 9.

Таблица 9

Диапазоны варьирования параметров режима ППД

Параметр	Обозначение	Диапазон значений
Подача	S , мм/об	0 – 0,7
Диаметр детали	D_d , мм	от 10
Диаметр ролика, шарика	D_p , мм	10 – 100
Частота вращения детали	n , об/мин	100 – 1200
Скорость обработки	V , м/мин	14 – 180
Профильный радиус ролика	$R_{пр}$, мм	2 – 15
Усилие деформирования	P , Н	20 – 3000
Действительный натяг ролика	h_d , мм	до 0,05 (0,1)
Исходная шероховатость детали	$Rz_{исх}$, мкм	8,1 – 141,6

5.11. Алмазное выглаживание

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 технологической системы.

5.12. Влияние технологических факторов на профиль очага деформации

В зависимости от интенсивности технологического воздействия инструмента на деталь формируются различные профили ОД, которые, по классификации В.М. Смелянского [2], подразделяются на четыре вида (рис. 5.21).

Очаг 1-го вида возникает при незначительном внедрении инструмента в деталь (рис. 5.21, а), которое приводит лишь к частичному сглаживанию неровностей за счет пластического осаживания их выступов и подъема впадин. Очаг деформации первого вида возникает при малых силах обработки, при обработке закаленных сталей или заготовок с большой шероховатостью поверхности. Контакт инструмента с заготовкой в этом случае прерывистый.

Увеличение силового режима обработки приводит к образованию ОД 2-го вида, в котором деформируются не только неровности, но и основной металл, что приводит к зарождению пластической волны, вершина которой не поднимается, однако, выше линии выступов шероховатости (рис. 5.21, б). Зарождение волны изменяет характер контакта инструмента с заготовкой. Часть контакта становится непрерывной, а часть – прерывистой, проходящей по выступам неровностей. В очаге деформации второго вида наблюдается пластический подъем металла обрабатываемой детали за инструментом.

Дальнейшее повышение силового режима обработки приводит к росту волны и образованию ОД 3-го вида, особенностью которого является возвышение вершины волны над линией выступов исходной шероховатости (рис. 5.21, в).

Наконец, при ППД могут возникнуть условия, при которых высота волны (рис. 5.21, г) становится чрезмерно большой, что приводит к разрушению ее вершины (ОД 4-го вида).

Установлено, что оптимальные режимы упрочнения при ППД всегда сопровождаются образованием ОД 3-го вида, в том числе при алмазном выглаживании закаленных сталей, поэтому с практической точки зрения формирование поверхностного слоя с образованием ОД 3-го вида представляет наибольший интерес [2].

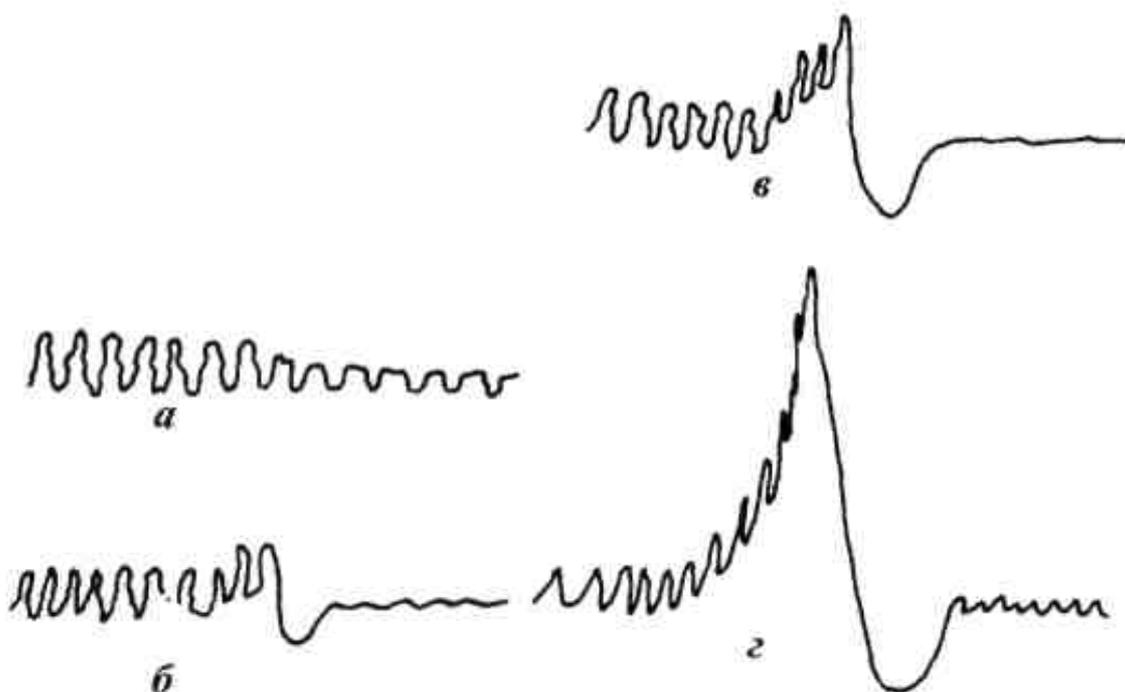


Рис. 5.21. Профили очагов деформации, возникающие при обкатывании и выглаживании

5.13. 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 последовательное 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 реза.

Недостатки СО:

1. Износ резца пропорционально отражается на размере обрабатываемой детали и последующее ППД 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.

Прогрессивным способом СО является размерное совмещенное обкатывание (PCO).

Способ основан 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_d между режущей кромкой и поверхностью заготовки и частично или полностью удаляет пластическую волну металла высотой h_e (заштрихованная область) (рис. 5.22).

Величина действительного натяга роликов существенно превышает принятые для традиционного ППД и может устанавливаться в широких пределах до $h_d = 0,05..1$ мм. Однако при PCO разрушения поверхности не происходит, потому что резец удаляет часть металла в районе вершины пластической волны.

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

При обработке PCO 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 Δ за роликом образует заднюю поверхность DEF длиной d_1 .

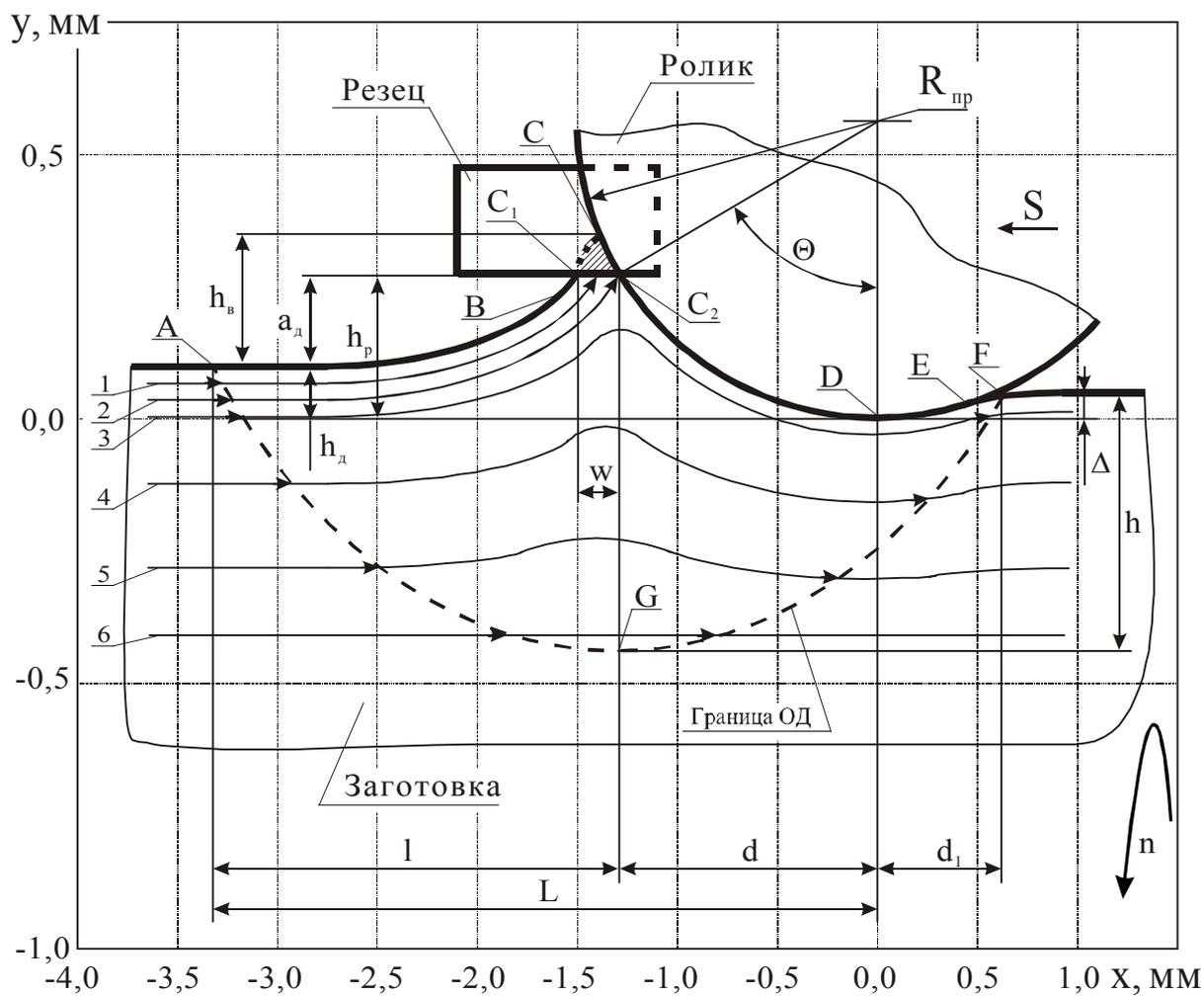


Рис. 5.22. Очаг деформации при обработке РСО (1-я схема)

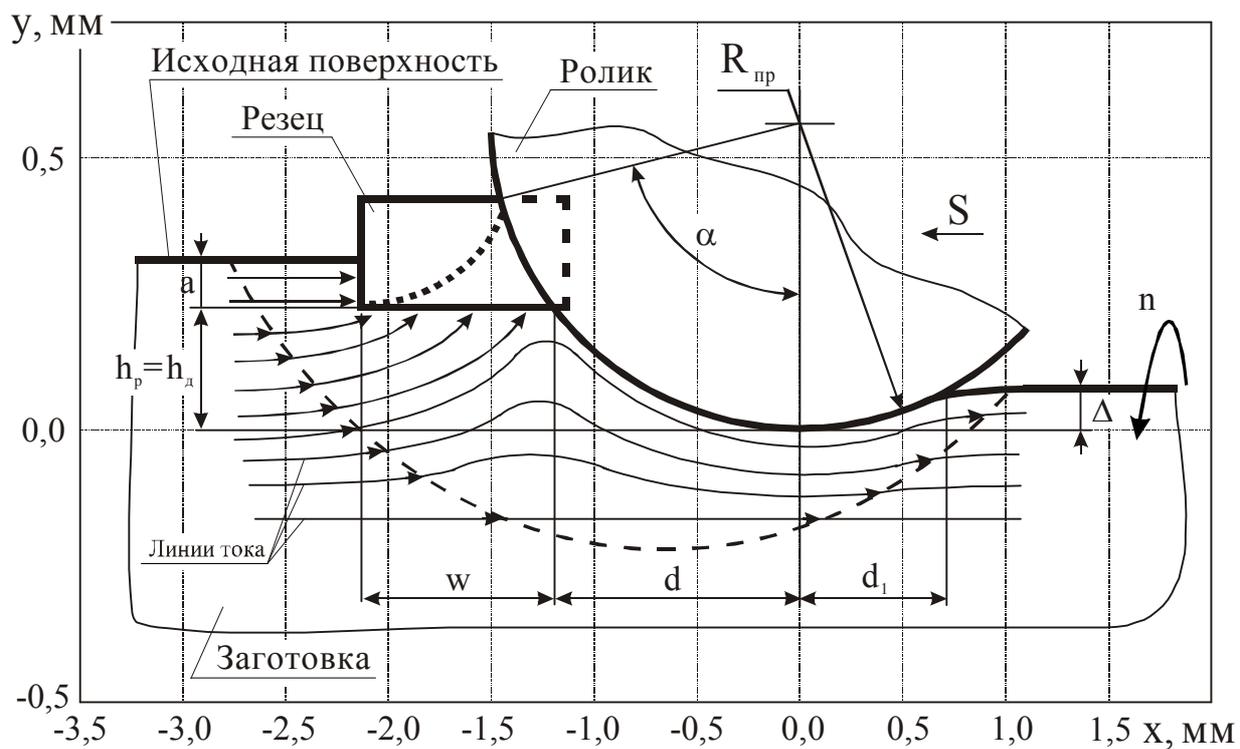


Рис. 5.23. 2-я схема размерного совмещенного обкатывания

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. 5.23). 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.

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. 5.22 и 5.23 резец и ролик условно сведены в одну плоскость).

При обработке РСО высокие требования предъявляются ко всей технологической системе. Однако, несмотря на высокую жесткость технологической системы, 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 квалитета.

Обработка характеризуется параметрами режима, представленными в таблице 10 (рис. 5.22 и 5.23).

Параметрами режима в наибольшей степени влияющими на течение процесса и качество поверхностного слоя являются: a_d , h_d , h_p , R_{np} .

Таблица 10

Диапазоны варьирования параметров режима РСО

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

6. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Для деталей одного типа можно разработать типовые ТП восстановления. Каждому типу деталей, как правило, соответствует свой участок восстановления, работающий по типовой технологии.

6.1. Корпусные детали

К ним относятся: станины, блоки и головки цилиндров, картеры сцеплений, крышки распределительных шестерен, корпуса масляных и водяных насосов и др. Материал корпусных деталей, полученных из отливок, – серый чугун (СЧ 18), алюминиевый (Ал-4) или цинковый (ЦАМ) сплавы. Наиболее распространенным является серый чугун.

Функции: относительное ориентирование движущихся деталей агрегата при его работе.

Отличительные признаки: коробчатая форма, необходимая для образования закрытого рабочего объема для размещения различных механизмов агрегата; жесткие стенки, подверженные статическим и динамическим нагрузкам, с оребренными приливами и бобышками, в которых выполнены гладкие и резьбовые отверстия или направляющие; наличие глубоких отверстий, выполненных в собранных деталях (в том числе из разных материалов), когда плоскость соединения проходит через ось отверстий; наличие стыковых плоскостей; высокая точность размеров, формы и расположения основных цилиндрических и плоских поверхностей.

Основные повреждения: трещины в стенках, обломы, коробление или износ стыков, разрушение резьб, деформация или износ направляющих и отверстий, коррозия. Детали с трещинами, проходящими через приливы с точными отверстиями и резьбами, подлежат выбраковке.

Восстанавливают: геометрические параметры элементов, прочность и сплошность материала.

Наиболее сложная в технологическом отношении корпусная деталь двигателя – это блок цилиндров, который на операциях изготовления собирается с крышками коренных подшипников и картером сцепления. Эта сборочная единица не разукрупняется при эксплуатации и ремонте.

Схема ТП восстановления: предварительная механическая обработка поврежденных участков детали; изготовление ДРД; сварочные (в том числе связанные с закреплением ДРД) и наплавочные работы; термические работы для снятия внутренних напряжений от сварки; напыление поверхностей; механическая обработка мест сварки; нанесение полимерных покрытий; установка ДРД, закрепляемых силами упругости, клеем и штифтами; черновая механическая обработка стыков и отверстий; нарезание резьб номинального и ремонтного размеров и установка спиральных резьбовых вставок; чистовая механическая обработка поверхностей; отделка поверхностей; очистка; контроль восстановления.

Основные восстанавливаемые элементы корпусной детали – это направляющие и отверстия под подшипники. В блоке цилиндров к ним относятся

коренные опоры, которые представляют собой точное, прерывистое по длине отверстие, выполненное одновременно как в блоке цилиндров, так и в привинченных крышках.

В ремонтном производстве апробированы такие способы создания припусков на восстанавливаемых поверхностях опор под подшипники: установка ДРД; нанесение эпоксидных композиций; проточное холодное железнение; газопламенная наплавка латуни; электродуговое и плазменное напыление.

Изношенные резьбы восстанавливают нарезанием резьбы ремонтного размера или заваркой отверстий с последующим сверлением и нарезанием резьбы номинального размера, или ввинчиванием вставки резьбовой спиральной в предварительно нарезанную резьбу большего диаметра.

Коренные опоры растачивают на специальных станках одновременно с обработкой отверстий во втулках распределительного вала. Плоские поверхности фрезеруют или шлифуют.

Контрольные операции в конце процесса восстановления состоят из проверки: чистоты детали, ее герметичности, размеров геометрических элементов и их взаимного расположения, шероховатости поверхностей. Размеры отверстий контролируют индикаторными нутромерами. Взаимное расположение поверхностей измеряют индикаторными средствами. Особое внимание обращают на контроль чистоты и герметичность масляных каналов.

6.2. Полюе тела вращения

К таким деталям относятся детали типа гильз и пальцев. Наиболее распространенный материал вставных гильз цилиндров (рис. 6.1) – серый чугун СЧ 24 или износостойкий чугун ИЧГ-33М твердостью 197...241 НВ. Наибольшему изнашиванию подвержено зеркало цилиндра. Деформируются центрирующие пояски и стыковые плоскости.

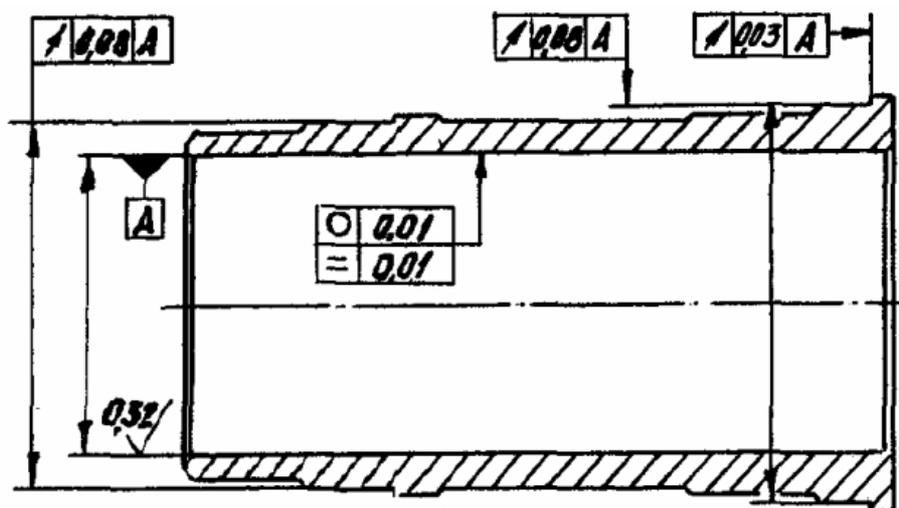


Рис. 6.1. Гильза цилиндров

При наличии припуска на обработку зеркало гильзы цилиндров обрабатывают под ремонтный размер. Реже припуски под обработку зеркала цилиндра создают установкой ДРД в виде закаленной свернутой стальной ленты, напека-

нием порошков, электроконтактной приваркой стальной ленты или термопластическим обжатием.

Постановка ДРД в виде свернутой ленты включает: предварительное растачивание восстанавливаемой детали, мерную отрезку стальной полосы, свертывание полосы в трубу в приспособлении к прессу, поочередное (по длине) запрессовывание ДРД в гильзу, хонингование.

При **центробежном индукционном напекании** порошков гильзу помещают в патрон установки с горизонтальной осью вращения, засыпают в гильзу порцию материала из композиции порошков и включают привод с частотой 350...450 мин⁻¹. Порошок равномерно распределяется по поверхности гильзы. В отверстие ее вводят высокочастотный индуктор и включают напряжение. В течение 1...1,5 мин порошок нагревается и припекается к гильзе. Выключают нагрев и спустя 1,2...2 мин выключают привод. Долговечность гильз с таким покрытием в 2...3 раза выше, чем у расточенных под ремонтный размер без покрытия.

Электроконтактная приварка стальной ленты на поверхность цилиндра обеспечивает прочное соединение ленты с деталью, хороший теплоотвод от зеркала цилиндра в тело гильзы и отсутствие зазоров в стыках ленты. Внутреннюю поверхность гильзы растачивают, в нее вставляют ленту, которую приваривают. Способ позволяет неоднократно восстанавливать гильзы, в том числе расточенные до одного из ремонтных размеров. Преимущества приварки – отсутствие нагрева детали, возможность приварки ленты с внедрением твердых сплавов и высокая производительность.

Термопластическое деформирование. Гильзу устанавливают на стол, которому сообщают вращение и поступательное движение снизу вверх. Подают токи высокой частоты на индуктор и охлаждающий раствор в спрейер. Температура нагрева гильз от индуктора 840...880°С. При равномерном перемещении индуктора со спрейером относительно гильзы создается тепловое поле в материале гильзы и наблюдается значительный осевой температурный перепад, который обеспечивает равномерное пластическое обжатие гильзы, создающее припуск на ее внутренней поверхности. Ресурс гильзы 85...90% от новой детали.

Возможно нанесение гальванических покрытий на зеркало цилиндра путем осаждения хрома, железа, железифосфористых и железоникелевых покрытий.

Механическая обработка зеркала гильзы сводится к растачиванию и хонингованию.

Зеркало цилиндра после растачивания хонингуют до получения точности 5-6 квалитета и шероховатости до 0,16 мкм. Овальность и конусообразность обработанного отверстия < 0,005 мм. Частота вращения хонинговальной головки при диаметре обработки 90...100 мм составляет 155 мин⁻¹ при скорости поступательного перемещения 12...18 м/мин. Давление брусков на зеркало цилиндра при чистовой обработке 0,5...0,8 МПа.

Приведенный режим обеспечивает эффект плосковершинного хонингования, в результате которого образуется несущая поверхность трения с шерохо-

ватостью 0,32 мкм, составляющая 70...90 % общей площади зеркала цилиндра. Остальную площадь занимают скрецающиеся риски глубиной 7...10 мкм от предварительного хонингования. Угол пересечения рисок зависит от соотношения скоростей возвратно-поступательного и вращательного движений хонинговальной головки, он должен составлять 43...55°. Последнее обстоятельство существенно, поскольку при угле пересечения рисок $< 43^\circ$ в процессе эксплуатации наблюдается сухое трение, а при угле $> 55^\circ$ – повышенный расход масла.

6.3. Валы, оси

Функции: для передачи момента и преобразования движений (поступательного во вращательное или наоборот). Наиболее сложные детали этой группы – это коленчатые (рис. 6.2) и распределительные валы, конструктивными элементами которых являются: шейки, кривошипы, кулачки, шпоночные пазы, торцы, стыки и отверстия.

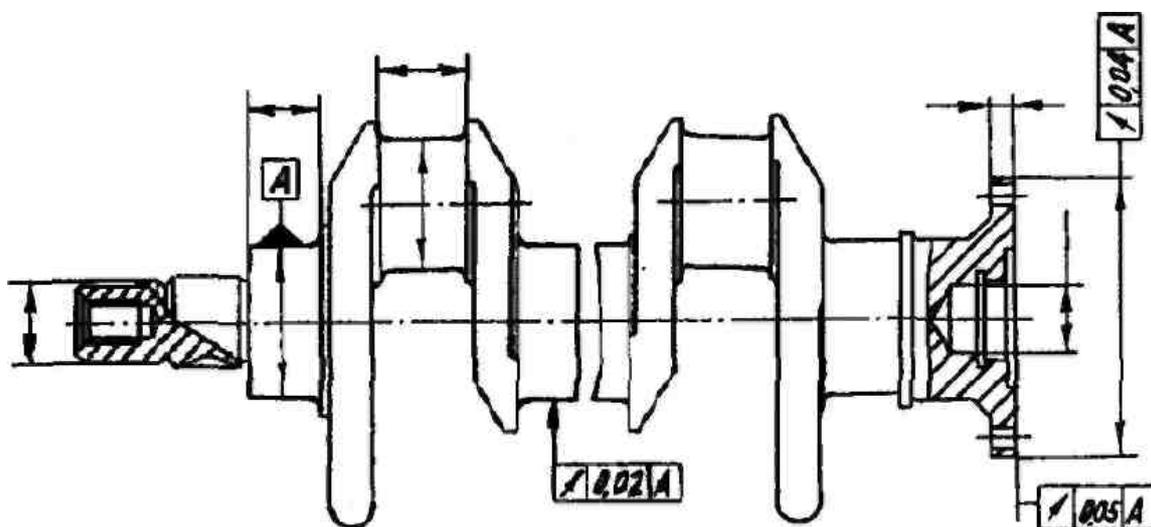


Рис. 6.2. Коленчатый вал

Оси в отличие от валов не передают крутящие моменты и нагружены только поперечными силами и изгибающими моментами. Оси содержат часть перечисленных конструктивных элементов, принадлежащих валам.

Коленчатые валы изготовлены из конструкционных (сталь 45) или легированных (18ХНВА) сталей или высокопрочного чугуна (ВЧ 50-2). Распределительные валы изготовлены из улучшаемых сталей 45, 40Г, 50Г или цементуемых 20, 20Г. Шейки и кулачки валов закалены ТВЧ на глубину 1,5...3,5 мм до твердости 36...60 HRC.

Основные повреждения: износ шеек, кулачков, пазов, отверстий и торцев, деформации, износ резьб, усталостные трещины.

Восстанавливают: расположение, форму, размеры и шероховатость элементов, износостойкость трущихся поверхностей и усталостную прочность. При восстановлении осей нет необходимости восстанавливать последнее свойство.

Точность обработки восстановленных шеек и кулачков – 5-7 квалитеты, шероховатость поверхностей Ra 0,32...0,63 мкм, точность углового расположе-

ния кулачков и кривошипов $\pm 7,5'$, допуск на радиус кривошипа $+0,05$ мм.

Схема ТП восстановления: определение места расположения и размеров усталостных трещин и принятие решения о целесообразности восстановления; правка; подготовка поверхностей под нанесение покрытий или установку ДРД; нанесение покрытий или установка и закрепление ДРД; термическая обработка; черновая механическая обработка; закалка шеек ТВЧ; чистовая механическая обработка; упрочнение галтелей; отделка шеек.

Чугунные детали с усталостными трещинами подлежат выбраковке. Отдельные неопасные трещины в стальных валах могут быть разделаны абразивным инструментом по всей длине с целью образования канавки радиусом $1,5...2,0$ мм и глубиной $0,2...0,4$ мм. Острые кромки следует притупить по периметру.

Правка необходима для придания прямолинейности ее оси, что, в свою очередь, позволяет уменьшить величину припусков на обработку, использовать все ремонтные размеры детали и уменьшить ее дисбаланс.

В зависимости от твердости материала предварительную механическую обработку шеек ведут точением или шлифованием.

Шейки валов допускают обработку под ремонтные размеры. Ремонтный интервал шеек, как правило $0,25$ мм. Восстановление под ремонтные размеры обеспечивает минимальную трудоемкость процесса.

Шейки с приваренными или припаянными ДРД окончательно шлифуют до номинального размера. Если ДРД закрепляют силами упругости по упорам, размер обеспечивают предварительным шлифованием и подбором толщины ленты ДРД.

Припуск на обработку отверстия под подшипник создают запрессовыванием ДРД или вибродуговой наплавкой. Отверстие обрабатывают с базированием детали по коренным шейкам, одна из них – самая близкая к обрабатываемому отверстию.

В качестве технологических баз у распределительных валов используют центровые отверстия и боковую поверхность шпоночного паза, а у коленчатых валов – дополнительно коренные шейки.

Уменьшение овальности конусо- и седло- образности шеек коленчатого вала с $0,01$ до $0,006$ мм увеличивает срок службы вкладышей в $2,5...4$ раза. Повышение точности поверхностей деталей достигается применением средств активного контроля в процессе обработки.

Усталостную прочность восстанавливают ППД.

Полирование является отделочной операцией, на которую оставляют припуск $0,005$ мм.

После восстановления контролируют следующие параметры деталей: твердость поверхностей шеек; размеры (диаметр и длину) шеек и шероховатость их поверхностей; диаметры фланца и отверстий под болты и подшипник; длины от базового торца до торцев шеек; ширину шпоночных пазов; биения всех соосных цилиндрических поверхностей относительно крайних шеек; радиусы кривошипов; угловое расположение всех кривошипов и кулачков относительно шпоночного паза.

7. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ

7.1. Методика расчета экономической эффективности

Реализация инновационных проектов на предприятии или в машиностроительной отрасли нуждается в анализе сравнительной экономической эффективности с учетом нынешних условий производства и потребления готовой продукции. При этом следует помнить, что эффект от производства новой техники (использования новых технологий, методов организации труда и моделей управления производством) образуется как у производителя новых, более совершенных деталей машин, так и у потребителя готовых изделий. У потребителя эффект проявляется за счет повышения качественных характеристик готовых изделий, снижения затрат на ремонт и эксплуатацию, а также за счет многих других факторов; у производителя – за счет снижения себестоимости изделия в результате внедрения новых технологий (автоматизации, безотходных производств) и новой техники.

Процесс восстановления и упрочнения деталей машин относится именно к тем производствам, в результате которых, в первую очередь, возникает эффект у потребителя (за счет повышения качества и коррозионной стойкости изделия).

По мнению многих авторов – специалистов по расчетам экономической эффективности, рациональность любого нововведения в народном хозяйстве (и создания, и внедрения) следует устанавливать на основе комплексного анализа результатов и затрат при изготовлении и использовании. При комплексном анализе определяется социальная, экономическая, техническая и организационная целесообразность создания новой техники.

Анализ может быть качественным и количественным. При качественном анализе не предполагается расчетов, он основан на экспертных оценках различных вариантов производства, но окончательный выбор того или иного варианта необходимо делать, сравнивая соответствующие показатели производства и потребления, то есть проводить количественный анализ.

При выборе того или иного варианта решающим критерием является минимум приведенных затрат на производство и потребление всей продукции, что равносильно росту производительности труда, а это, в свою очередь, является решающим фактором любой экономической системы.

Приведенные затраты определяются по формуле:

$$Z = C + E_H \cdot K_{yd}, \quad (8)$$

где Z – приведенные затраты, руб.;

C – себестоимость единицы продукции, руб.;

E_H – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности (следует брать на уровне 0,15 – 0,25);

K_{yd} – удельные капитальные вложения, руб.

Таким образом, эффект от новой техники (технологии, качества) в самом общем виде можно рассчитать по формуле:

$$\mathcal{E} = Z_{\text{баз}} - Z_{\text{нов}}, \quad (9)$$

где \mathcal{E} – эффект руб.;

$Z_{\text{баз}}$ – приведенные затраты в случае базового варианта производства, руб.;

$Z_{\text{нов}}$ – приведенные затраты при новом варианте производства, руб.

Для объективности результатов необходима корректировка различных показателей базового варианта производства для достижения равенства по:

- фактору времени;
- условиям работы;
- качеству;
- производительности труда и техники;
- объемам производства.

Базовые затраты, приведенные по объемам производства к новому варианту:

$$Z_{\text{баз}} = (C_{\text{пер}} \cdot \frac{V_2}{V_1} + C_{\text{пост}}) + E_H \cdot K_{\text{уд}} \cdot \frac{V_2}{V_1}, \quad (10)$$

где $Z_{\text{баз}}$ – базовые приведенные затраты, руб.;

$C_{\text{пер}}$ – переменные базовые затраты в себестоимости единицы изделия, руб.;

$C_{\text{пост}}$ – постоянные базовые затраты в себестоимости единицы изделия, руб.;

$\frac{V_2}{V_1}$ – коэффициент приведения к новому варианту по объему производства продукции;

E_H – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности;

$K_{\text{уд}}$ – удельные капитальные вложения, руб.

При расчетах экономического эффекта по фактору времени приводят капитальные вложения:

$$K_{\text{прив}} = \sum_{i=1}^T K_i \cdot (1 + E)^t, \quad (11)$$

где $K_{\text{прив}}$ – приведенные капитальные вложения, руб.;

K_i – капитальные вложения в i -тый год;

i – порядковый номер года;

T – общий период времени, в годах; $t = T - i$;

E – коэффициент, учитывающий экономию капитальных вложений (среднегодовой рост производительности общественного труда). Рекомендуется брать этот коэффициент на уровне 0,1.

Рассмотрим пример расчета приведенных по фактору времени капитальных вложений.

Пример 1. Существует два варианта развития производства. В первом случае планируется потратить 148 миллионов рублей, которые распределены в

течение четырех лет следующими долями: первые три года – по 20%, в последний год – 40%. Второй вариант инвестирования предполагает капитальные вложения в размере 150 миллионов рублей, которые распределены следующим образом: первый год – 90 миллионов рублей, второй и третий – по 30 миллионов рублей. При прочих равных условиях требуется выбрать наилучший вариант инвестирования.

Решение. Выбор наилучшего варианта необходимо проводить по минимуму приведенных капитальных вложений.

$$K_{прив}^1 = 0,2 \cdot 148 \cdot (1 + 0,1)^{4-1} + 0,2 \cdot 148 \cdot (1 + 0,1)^{4-2} + 0,2 \cdot 148 \cdot (1 + 0,1)^{4-3} + 0,4 \cdot 148 \cdot (1 + 0,1)^{4-4} = 29,6 \cdot 1,331 + 29,6 \cdot 1,21 + 29,6 \cdot 1,1 + 59,2 = 166,97 \text{ млн.руб.}$$

$$K_{прив}^2 = 90 \cdot (1 + 0,1)^{3-1} + 30 \cdot 1,1 + 30 = 108,9 + 33 + 30 = 171,9 \text{ млн.руб.}$$

Таким образом, следует сделать вывод о целесообразности развития производства по первому варианту.

В случае приведения одного из вариантов по качеству к другому необходимо добавить к капитальным затратам стоимость дополнительного оборудования, оснастки, приспособлений, инструментов, которые позволят добиться одинакового качества.

Приведение вариантов к одинаковым условиям работы также требует дополнить размер капитальных вложений худшего варианта по условиям труда суммами, необходимыми для установки вытяжек, вентиляции, освещения и т.д., для соблюдения условий сопоставимости.

При оценке эффекта следует различать период его расчета и источники его появления. Так, наиболее общей формулой годового экономического эффекта следует считать формулу разницы приведенных затрат, которая указывалась выше, но с учетом годовой программы выпуска.

$$\mathcal{E} = (Z_1 - Z_2) \cdot V_2 = [(C_1 + E_H \cdot K_1) - (C_2 + E_H \cdot K_2)] \cdot V_2, \quad (12)$$

где \mathcal{E} – годовой экономический эффект, руб.;

Z_1 – приведенные затраты при базовом варианте, руб.;

Z_2 – приведенные затраты при проектном варианте, руб.;

V_2 – объем производства при проектном варианте, шт.;

Использование этой формулы актуально для расчета экономического эффекта от внедрения новой технологии, техники, автоматизации производства.

Годовой экономический эффект для методов восстановления и упрочнения может быть рассчитан на основе оценки возможной или фактической дополнительной прибыли (прибыли от качества), которую получает предприятие, пользуясь более стойкими, долговечными инструментами, оснасткой, приспособлениями.

$$\mathcal{E} = (\Delta\Pi - E_H K_2) \cdot V_2, \quad (13)$$

где $\Delta\Pi$ – дополнительная прибыль от качества, руб.;

K_2 – затраты на новое качество, руб.

По причине того, что использование технологий восстановления и упрочнения создает полезный эффект как у производителя, так и у потребителей, для его расчета возможно использование формулы «народнохозяйственного

экономического эффекта от производства и использования нового средства труда долговременного применения с улучшенными качественными характеристиками».

$$\Theta = \left(Z_1 \cdot \frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} + \frac{(I_1' - I_2') - E_H \cdot (K_2' - K_1')}{P_2 + E_H} - Z_2 \right) \cdot V_2, \quad (14)$$

Z_1 – приведенные затраты на единицу при базовом варианте, руб.;

Z_2 – приведенные затраты на единицу при проектном варианте, руб.;

B_2, B_1 – объемы продукции, которые выпускают при проектном и базовом вариантах, шт. Соотношение этих величин используют в качестве коэффициента приведения показателей базового варианта к проектному по объемам выпуска;

P_1, P_2 – доля амортизационных отчислений на реновацию при обоих вариантах;

$$P = \frac{1}{T}, \quad (15)$$

T – срок службы оборудования, лет;

I_1', I_2' – годовые текущие издержки потребителя при использовании им базового и нового оборудования, руб. Издержки базового варианта необходимо рассчитывать с учетом выпуска продукции при новом варианте, то есть умножить на коэффициент $\frac{B_2}{B_1}$;

K_1', K_2' – сопутствующие капитальные вложения потребителя при внедрении и использовании им нового средства труда при разных вариантах, руб. Базовые капитальные вложения также необходимо привести к капитальным вложениям при проектном варианте, умножив на коэффициент $\frac{B_2}{B_1}$;

V_2 – годовой объем производства оборудования при проектном варианте.

Решим две задачи по расчету годового экономического эффекта с использованием разных формул.

Пример 2. Определить годовой экономический эффект от создания и использования нового универсального станка, на составные элементы которого нанесено МДО-покрытие. Исходные данные приведены в таблице 11.

Таблица 11

Показатель	Базовый вариант	Новый вариант
1. Годовой выпуск станков, шт.	35	30
2. Себестоимость станка, руб.	1 500 000	1 900 000
3. Срок службы, лет	8	15
4. Приведенные к единице выпуска капвложения, руб.	10 000	15 000
5. Производительность станка, шт./час	50	70
6. Годовые текущие издержки эксплуатации одного станка, руб.	8 500	11 000
7. Сопутствующие капитальные вложения потребителя, руб.	15 000	21 000

Решение.

Подставляем в формулу народнохозяйственного эффекта (14) соответствующие величины.

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= [(1500000 + 0,15 \cdot 10000) \cdot \frac{70}{50} \cdot \frac{1/8 + 0,15}{1/15 + 0,15} + \frac{(8500 \cdot 1,4 - 11000) - 0,15 \cdot (21000 - 15000 \cdot 1,4)}{1/15 + 0,15} - \\ &- (1900000 + 0,15 \cdot 15000)] \cdot 30 = [1501500 \cdot 1,4 \cdot \frac{0,275}{0,22} + \frac{900}{0,22} - 1902250] \cdot 30 = \\ &= (2627625 + 4091 - 1902250) \cdot 30 = 21883980 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Полученное значение является совокупным годовым экономическим эффектом производителя и всех потребителей нового станка с улучшенными качественными характеристиками.

Пример 3. Рассчитать дополнительную прибыль от нового качества, которое предприятие получит в текущем году, если годовой экономический эффект от повышения коррозионной стойкости изделия составит 150 000 рублей, годовая программа выпуска предполагается на уровне 1000 штук, а дополнительные капитальные вложения для повышения коррозионной стойкости изделия составят 75 000 рублей.

Решение. Для решения поставленной задачи выразим из формулы (13) $\Delta\Pi$ и подставим известные значения:

$$\Delta\Pi = \frac{\mathcal{E}}{V_2} + E_H K_2 = \frac{150000}{1000} + 0,15 \cdot 75000 = 150 + 11250 = 11400 \text{ руб.}$$

Таким образом, качественный расчет годового экономического эффекта, с учетом как можно большего количества факторов, является важным элементом в процессе выбора, внедрения и производства с использованием нового оборудования, технологии и т.д. В современных российских условиях важность подобных расчетов многократно возрастает, так как любое решение необходимо принимать с учетом всевозможных затрат и результата, которое будет иметь принятие такого решения.

7.2. Цех комбинированного упрочнения деталей машин деформационными и физико-химическими методами

Изменение технологических процессов имело своей целью повышение конкурентоспособности выпускаемых изделий за счет повышения качества и долговечности продукции, а также снижение затрат на проектирование, производство и эксплуатацию.

Цель рассматриваемого проекта: повышение качества и долговечности деталей машин на основе использования инновационных технологий поверхностного пластического деформирования (ППД), размерного совмещенного обкапывания (РСО), микродугового оксидирования (МДО) и электроэрозионного синтеза покрытий (ЭЭСП).

Проект реализован на базе Кузбасского регионального инновационного центра «КузбассРИЦ» (г. Кемерово).

Цех инновационных машиностроительных технологий состоит из 4-х

участков.

Первый участок: участок по упрочнению и восстановлению изношенных деталей машин из различных конструкционных материалов на основе применения технологий поверхностного пластического деформирования (ППД) и размерного совмещенного обкатывания (РСО).

Второй участок: участок по нанесению твердых покрытий методом электроэрозионного синтеза.

Третий участок: участок по нанесению коррозионно-стойких МДО-покрытий на основе использования оригинальных источников тока модели ИТТ МАМИ-1 и результатов научных исследований, полученных в рамках данной работы.

Четвертый участок: участок (отдел) по исследованию и внедрению современных машиностроительных технологий, тиражированию инновационных технологий на машиностроительных предприятиях и экспертной оценке свойств конструкционных материалов.

Расчет экономической эффективности производился при помощи программной системы Project Expert по методике, разработанной фирмой Pro Invest Consulting (г. Москва) [21-22]. Сущность этой методики заключается в оценке финансовой деятельности участка в заданном временном интервале. Важнейшей особенностью этой методики является то, что она базируется на классических принципах инвестиционного анализа, построенных, в свою очередь, на основе анализа денежных потоков.

Основные расчеты проводились по следующим формулам [21-22]:

- прямые производственные затраты:

$$C_{п.п} = C_m + C_{комп} + C_{з/пл} + C_э + C_{др}, \quad (16)$$

где перечислены затраты соответственно на материалы, комплектующие, сдельную заработную плату, энергию, расходуемую на технологические нужды и другие;

- постоянные производственные затраты:

$$C_{пост} = C_{сбыт} + C_{адм} + C_{произ}, \quad (17)$$

где перечислены затраты на маркетинг и сбыт продукции, административные затраты и постоянные производственные затраты.

Вся деятельность цеха инновационных технологий, включая участок МДО, в соответствии с принятой методикой подразделяется на операционную, инвестиционную и финансовую.

Операционная деятельность предполагает получение дохода за счет поступлений от сбыта продукции. Инвестиционная деятельность предполагает затраты на приобретение активов, поступления от продажи активов и другие издержки подготовительного периода. Финансовая деятельность предполагает наличие у предприятия акционерного капитала, кредитов, займов и выплат по ним процентов и сумм основного долга и др.

В процессе выполнения расчетов были учтены: темпы инфляции на основные виды издержек; налоговое окружение; цены сбыта продукции и др.

Интегральные показатели проекта рассчитывались по формулам [21-22]:

- период окупаемости:

$$PVD = \frac{\Pi}{ACI}, \quad (18)$$

где Π – сумма инвестиций; ACI – ежегодные поступления;

- чистая приведенная величина дохода:

$$NPV = -Invest + \sum CF(t) \cdot \left[1 + \frac{Interest}{100} \right]^{-t}, \quad (19)$$

где $Invest$ – сумма инвестиций; $Interest$ – годовая процентная ставка; $CF(t)$ – денежные поступления в период времени t ;

- индекс прибыльности:

$$PI = \frac{PVC I}{PVC O}, \quad (20)$$

где $PVC I$ – приведенные поступления; $PVC O$ – приведенные выплаты;

- внутренняя норма рентабельности IRR :

$$\sum CF(t) \cdot \left[1 + \frac{IRR}{100} \right]^{-t} - Invest = 0. \quad (21)$$

Расчеты проводились по состоянию на 01.06.2004 лаг (продолжительность) расчетов составлял 2 года.

На печать выводились: счет прибылей и убытков, прогнозный баланс и план денежных потоков. План денежных потоков фиксирует основные виды деятельности и предполагает положительные остатки денежных средств на счетах предприятия в начале и конце каждого расчетного периода.

Производство с использованием инновационных технологий, и, в частности, технологии МДО, можно охарактеризовать как эффективное.

Использование научных результатов позволило в 1,2 раза сократить сроки и в 1,25 раза – трудоемкость технологической подготовки производства, повысить качество и долговечность ответственных деталей машин в 1,3-2,2 раза. У нас есть оригинал акта о внедрении с этими данными.

Расчетные интегральные показатели от внедрения указанных мероприятий в виде инновационного проекта составили:

1. Срок окупаемости проекта: $PBP = 14$ месяцев.
2. Индекс прибыльности: $PI = 1,38$.
3. Внутренняя норма рентабельности: $IRR = 67\%$.
4. Чистый приведенный доход: $NPV = 485\,000$ руб. на временном периоде в 24 месяца.

В процессе финансового моделирования возможных сценариев проведен анализ чувствительности проекта по чистому приведенному доходу, дисконтированному периоду окупаемости и внутренней норме рентабельности, который показал устойчивость проекта к изменениям внешней среды.

На основании представленных результатов экономических расчетов был сделан вывод о том, что предлагаемый инвестиционный (инновационный) про-

ект может быть реализован при существующей экономической ситуации, а вариант, который принят в проекте, является наиболее предпочтительным.

7.3. Участок МДО

Участок МДО включает в себя следующее оборудование:

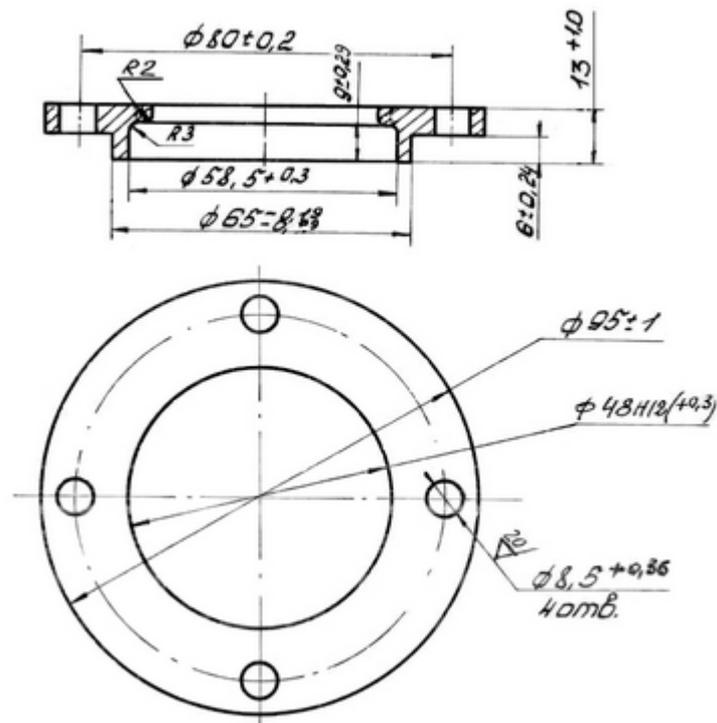
- источник технологического тока, обеспечивающий подачу на обрабатываемое изделие переменного тока с изменяемой в зависимости от количества обрабатываемых изделий амплитудой. В процессе нанесения покрытия происходит саморегулирование амплитуды по мере увеличения толщины покрытия;
- ванну технологическую, выполненную из коррозионно-стойкой стали с рабочим объемом 1м³. Токоподводящая шина изолируется от корпуса ванны прокладкой из диэлектрического материала. Внутри ванны быть расположена система охлаждения (радиатор, через который течет водопроводная вода). Система охлаждения обеспечивает поддержание температуры электролита не более 50° С на любых режимах. Система барботажирования работает от компрессора, который обеспечивает расход воздуха не менее 0,5 л/мин;
- защитный шкаф для электробезопасности установки;
- вытяжную систему. Вытяжной шкаф выполнен из оргстекла и имеет фиксирующиеся в определенных положениях дверки; при открытых дверках работа установки блокируется. Шкаф имеет отверстие для подключения к вытяжной системе цеха;
- вспомогательные ванны для предварительной очистки от грязи и обезжиривания деталей (только в случае сильного загрязнения заготовок);
- печь марки СНОЛ 1,6.2,5.1/11-И2 для последующей термической обработки комбинированных покрытий;
- столики для вспомогательных работ.

Установка размещена на площади около 20 м². Участок имеет силовой щит и трансформатор на 380 В для подключения ИТТ, защитный заземляющий контур для предотвращения поражения персонала шаговым напряжением (все оборудование должно быть заземлено), магистрали холодной и горячей воды и сток для ее слива. Для приготовления электролита установлен дистиллятор.

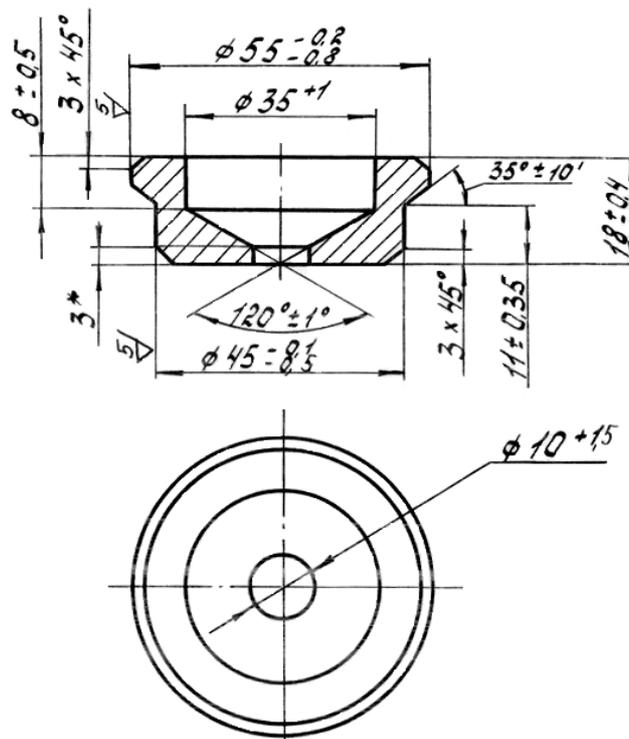
Микродуговому оксидированию по разработанной технологии подвергаются следующие детали:

- детали автомобилей и автобусов: детали большого масляного насоса гидромеханической передачи автобуса ЛиАЗ, поршень и гильза цилиндров ДВС и др.;
- детали горно-шахтного оборудования: корпуса, втулки и крышки гидромуфт, барашки, панели и др.

Проектирование технологического процесса МДО представлено на примере крышки и втулки гидромуфты привода шахтного конвейера, изготовленных из алюминиевого сплава АК7 (рис. 7.1).



а)



б)

Рис. 7.1. Крышка (а) и втулка (б)

Крышки и втулки, работая в подземных выработках угольных и сланцевых шахт всех категорий, опасных по газу (метану) и угольной пыли, подвергаются воздействию агрессивной среды. Существует проблема повышения долговечности данных деталей, суть которой заключается в том, что коррозионному воздействию подвергаются детали целиком.

Анализ конструкции деталей и базовой технологии их изготовления пока-

зал целесообразность введения дополнительной операции для защиты от коррозии методом МДО.

К качеству МДО-покрытия предъявляются следующие требования:

- низкая пористость покрытия;
- толщина покрытия 10 мкм.

На основе разработанных рекомендаций задана толщина покрытия 10 мкм, введено барботажирование электролита сжатым воздухом; для получения тонких МДО-покрытий, обладающих достаточной коррозионной стойкостью, использован щелочной электролит с высокой интенсивностью и ограниченным временем оксидирования.

Такая обработка формирует плотные покрытия с достаточно низкой пористостью и без образования муллитного слоя. Исходя из сказанного назначена следующая концентрация электролита: $C_{\text{KOH}} = 4$ г/л, $C_{\text{H}_2\text{O}_2} = 6$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = 2$ г/л; $j = 40$ А/дм², площади обрабатываемых деталей $S_{\text{к}} = 2,6$ дм² и $S_{\text{в}} = 0,9$ дм².

Для нанесения МДО-покрытий использованы источник ИТТ МАМИ-1, технологическая ванна объемом 1 м³ и комплект зажимных приспособлений.

Были получены следующие параметры качества покрытия: толщина $h = 10$ мкм, матовое светло-серое МДО-покрытие, муллитный слой отсутствует, коррозионная стойкость составляет 39 ч, превышение значения по коррозионной стойкости требуемой по ГОСТ в 9,5 раз.

Исходные данные для выполнения экономических расчетов приведены в табл. 12.

Таблица 12

Исходные данные для расчета себестоимости крышки и втулки (пример)

Наименование	Величина
Количество смен	2
Действительный годовой фонд времени при двухсменном режиме работы	3 448 час.
Расход электроэнергии	2 кВт/час
Стоимость электроэнергии	2,26 руб./кВт*ч
Производительность нанесения МДО-покрытия	≈ 1 мкм/мин
Основное время оксидирования поверхности площадью ≈ 1 дм ²	10 мин
Вспомогательное неперекрываемое время	5 мин
Число установок для МДО	1
Число одновременно обрабатываемых деталей (с учетом предельного значения тока 200 А)	1
Расход электролита в неделю (без учета расхода воды на охлаждение и стойкости 5 дней)	1 000 л
Затраты на химреактивы в неделю: KOH, H ₂ O ₂ , Na ₂ SiO ₃	757,78 руб.
Стоимость источника тока и других основных средств технологического оснащения	450 000 руб.
Потребные производственные площади	20 м ²
Количество основных рабочих в смену	2 чел.
Заработная плата в месяц одного рабочего	15 000 руб.

Учитывая мелкосерийный тип производства, расчеты проводились по приведенной программе, которая составила 1 250 шт. в год для всех изделий, обрабатываемых на участке МДО (табл. 13).

Таблица 13

Расчет себестоимости

Статья калькуляции	Расчет	На годовую приведенную программу выпуска, руб.	На единицу изделия, руб.
1. Сырье, основные и вспомогательные материалы	$\frac{757,78}{5 \cdot 16} \cdot 3448$	32660,32	28,53
2. Топливо и электроэнергия	$3448 \cdot 2,26$	7792,5	6,23
3. Зарботная плата основных производственных рабочих	$15000 \cdot 12 \cdot 2$	360000	288
4. Дополнительная зарботная плата основных производственных рабочих	$15000 \cdot 0,1 \cdot 12 \cdot 2$	36000	28,8
5. Единый социальный налог (ЕСН)	$(360000 + 36000) \cdot 0,26$	102960	82,37
6. Расходы по содержанию и эксплуатации оборудования (РСЭО)	Включены амортизационные отчисления $(0,1 \cdot 450000)$ и расходы на вспомогательные материалы $(0,05 \cdot 450000)$	$45000 + 22500 = 67500$	54
Цеховая себестоимость		606912,82	485,53

Годовой экономический эффект от повышения коррозионной стойкости и качества изделия в целом:

$$\mathcal{E} = (П - E_n \cdot K) \cdot V = (67783,27 - 0,15 \cdot 450000) \cdot 1250 = 354090 \text{ руб.},$$

где $П$ – прибыль от нового качества изделия; E_n – нормативный коэффициент эффективности дополнительных капитальных вложений; K – дополнительные капитальные вложения; V – приведенная программа выпуска.

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. Вендров А. М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем / А. М. Вендров. – М.: Argussoft Co, 1999. – 86 с.
9. Марка Давид. Методология структурного анализа и проектирования / Давид Марка, Клемент МакГоуэн ; Пер. с англ. – М.: 1993. – 240 с. – ISBN 5-7395-0007-9 (в пер.).
10. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний : справочник / Л. М. Школьник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
11. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
12. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / Под. ред. А. М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
13. Технологические основы управления качеством машин / А. С. Васильев и др. – М., Машиностроение, 2003. – 256 с.: ил.
14. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.
15. Норенков И. П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. / И. П. Норенков, П. К. Кузьмик. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.: ил.
16. Соломенцев Ю. М. Информационно-вычислительные системы в машиностроении. CALS-технологии. / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, В. В. Павлов, А. В. Рыбаков. – М.: Наука, 2003. – 292 с.
17. Ящерицын П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – М.: Наука и техника, 1977. – 256 с.

18. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой / Б. М. Аскинази. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
19. Шаврин О. И. Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин / О. И. Шаврин. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.: ил.
20. Пантелеенко Ф. И. 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.
21. Идрисов А. Б. Стратегическое планирование и анализ эффективности инвестиций / А. Б. Идрисов, С. В. Картышев, А. В. Постников. – М.: Информационно-издательский дом "Филинь", 1996. – 272 с.
22. Беренс В. Руководство по оценке эффективности инвестиций: Пер. с англ. перераб. и дополн. изд / В. Беренс, П. М. Хавранек. – М.: Интерэксперт, ИНФРА-М, 1995. – 528 с.