

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Детали машин, путевые и строительные машины»

В. А. ДОВГЯЛО

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

*Утверждено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебника для студентов учреждений высшего образования
по специальности «Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных,
путевых, дорожно-строительных машин и оборудования»*

Гомель 2018

УДК 621.81 (075.8)
ББК 34.41
Д58

Рецензенты: зав. кафедрой «Тракторы» Белорусского национального технического университета доктор технических наук, профессор *В. П. Бойков*;
кафедра «Транспортные и технологические машины» Белорусско-Российского университета (зав. кафедрой кандидат технических наук, доцент *И. В. Лесковец*)

Довгяло, В. А.

Д58 Методы повышения работоспособности машин и механизмов : учеб. / В. А. Довгяло ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2018. – 374 с.
ISBN 978-985-554-719-9

Систематизированы основные методы повышения работоспособности строительных, дорожных и путевых машин с позиций их полного жизненного цикла. Рассмотрены ресурсосберегающие мероприятия (организационные, конструкторские, материально-ведческие, технологические и др.) по обеспечению работоспособности машин при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Предназначен для студентов специальности 1-37 02 03 «Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных, путевых, дорожно-строительных машин и оборудования» и других специальностей, связанных с проектированием, модернизацией и эксплуатацией строительных, дорожных и путевых машин, а также для магистрантов, аспирантов и слушателей системы повышения квалификации.

УДК 621.81 (075.8)
ББК 34.41

ISBN 978-985-554-719-9

© Довгяло В. А., 2018
© Оформление. БелГУТ, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
1 ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ МАШИН.....	9
Контрольные вопросы к разделу 1.....	20
2 РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАШИН.....	21
2.1 Показатели надежности.....	21
2.2 Основные факторы физического старения машин.....	28
2.3 Усталостное разрушение деталей и конструкций.....	31
2.4 Изнашивание деталей в узлах трения.....	43
2.5 Коррозионное разрушение деталей и конструкций.....	51
2.6 Повышение надежности деталей и конструкций.....	55
Контрольные вопросы к разделу 2.....	60
3 МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ.....	61
3.1 Разработка проектно-конструкторской документации.....	63
3.2 Общие правила и методика ресурсосберегающего конструирования.....	70
3.3 Особенности автоматизированного проектирования.....	74
3.4 Расширенное применение унификации, агрегатирования и блочно-модуль- ной компоновки.....	80
3.5 Экологические приоритеты при проектировании и конструировании.....	89
Контрольные вопросы к разделу 3.....	92
4 ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННЫХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ.....	93
4.1 Материалы со стабильными свойствами для основных деталей и конструк- ций машин.....	94
4.2 Износостойкие материалы рабочих органов машин для земляных работ.....	101
4.3 Композиты с комплексами особых свойств.....	106
4.4 Ленточные антифрикционные материалы для тяжелонагруженных узлов трения.....	124
4.5 Наноматериалы и нанотехнологии.....	127
4.6 Адаптивные материалы и конструкции.....	138
Контрольные вопросы к разделу 4.....	146
5 РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАБО- ТОСПОСОБНОСТИ МАШИН ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ.....	147
5.1 Основные направления повышения работоспособности.....	147
5.2 Технологическая рациональность конструктивных решений.....	147
5.3 Специализация производства и типизация технологических процессов при изготовлении деталей.....	161

5.4 Обеспечение точности размеров и качества поверхности деталей при механической обработке.....	177
5.5 Термическая, химико-термическая и термомеханическая обработка деталей	191
5.6 Обеспечение требуемого качества сборки узлов и агрегатов.....	211
Контрольные вопросы к разделу 5.....	219
6 ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ	220
6.1 Основные направления повышения работоспособности.....	222
6.2 Совершенствование организации технического обслуживания и ремонта ...	223
6.3 Диагностирование машин	239
6.4 Дефектация деталей	244
6.5 Классификация основных методов восстановления деталей	258
Контрольные вопросы к разделу 6	262
7 ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ НАПЛАВКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ ...	263
7.1 Газотермическая (газопламенная) наплавка	266
7.2 Электротермическая наплавка	269
Контрольные вопросы к разделу 7	284
8 ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ НАНЕСЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ	285
8.1 Газотермическое (газопламенное) напыление.....	289
8.2 Способы электротермического напыления	297
8.3 Нанесение электролитических покрытий	306
Контрольные вопросы к разделу 8	315
9 ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСАДОК	316
Контрольные вопросы к разделу 9.....	323
10 ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ МАТЕРИАЛА	324
Контрольные вопросы к разделу 10	331
11 МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	332
11.1 Восстановление клеевыми материалами и композициями.....	332
11.2 Восстановление герметиками	339
11.3 Нанесение полимерных покрытий.....	344
11.4 Защитно-декоративная отделка деталей и конструкций.....	354
Контрольные вопросы к разделу 11	361
12 УТИЛИЗАЦИЯ МАШИН И РЕЦИКЛИНГ МАТЕРИАЛОВ	362
Контрольные вопросы к разделу 12	372
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	373

ПРЕДИСЛОВИЕ

Строительство, реконструкцию, ремонт и содержание автомобильных и железных дорог осуществляют машинами различного назначения (строительными, дорожными, путевыми), а также комплектами и комплексами на их основе. Темпы и качество строительных и ремонтных работ зависят от многих факторов, в числе которых рациональное сочетание и взаимная согласованность показателей машин, составляющих комплекты и комплексы, а также работоспособность каждой машины.

Работоспособность машины – это ее способность выполнять заданные функции и сохранять свои параметры в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Данное определение согласуется с более общей характеристикой работоспособности, изложенной в ГОСТ 27.002–89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения»: «**Работоспособность** – это состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации».

Различают работоспособное и неработоспособное состояния машины. **Работоспособным** называют состояние машины, при котором значения параметров, определяющих ее способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации. **Неработоспособным** – состояние, при котором значение хотя бы одного параметра не соответствует требованиям упомянутой документации.

Работоспособность любой машины как сложной технической системы зависит от работоспособности элементов, составляющих эту систему, т.е. узлов, агрегатов и деталей. Потеря или снижение работоспособности любого элемента ведет к потере или снижению работоспособности машины в целом.

Переход от работоспособного к неработоспособному состоянию, т.е. возникновение отказа (или снижение работоспособности), обусловлен физическим старением деталей и конструкций машины, в основе которого лежат процессы изнашивания и ухудшения свойств материалов деталей, конструкций и сборочных единиц машины.

Переход от неработоспособного к работоспособному состоянию, т.е. устранение отказа, связан с восстановлением свойств материалов, формы и размеров деталей и конструкций машины путем использования ремонтно-восстановительных мероприятий, которые регламентированы стандартом ГОСТ 18322–78 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения».

Обеспечение высокого уровня работоспособности машин в условиях все возрастающих запросов потребителей машиностроительной продукции базируется на комплексном подходе к созданию и функционированию машин. В Беларуси производство дорожных и строительных машин развивается с учетом современных тенденций, характерных для мирового машиностроения. В их числе ресурсосбережение и обеспечение безопасности эксплуатации машин, включая экологическую безопасность, повышение надежности конструкции машин и интенсификация рабочих процессов. Вместе с тем, по данным Госкомстата, доля экспорта белорусской продукции с высоким уровнем наукоемкости составляет всего 3–4 %. Несмотря на явные успехи отечественных машиностроителей на поприще ресурсосбережения, эта проблема сохраняет свою актуальность и по сей день. По данным экспертов Минэкономики Беларуси показатели энергоемкости белорусской продукции выше в 1,5–2,0 раза, чем западноевропейской. При этом производительность труда в целом по республике ниже, чем в странах Евросоюза, в 4–5 раз, т.е. удельные показатели энергоемкости отстают еще более значительно.

Поэтому от отечественных производителей требуется наращивание экспортного потенциала за счет создания машин, конкурентоспособных на мировом рынке, включая рынки развитых стран. Задача разработчиков состоит в создании машин, обладающих не только повышенными технико-экономическими, конструктивными и эксплуатационными показателями по сравнению с существующими машинами аналогичного назначения, но и экологической совместимостью с внешней средой.

Решение этих задач базируется на концепции полного жизненного цикла (ПЖЦ) машин. Как известно, жизненный цикл машины начинается с зарождения идеи, включает научные исследования, а также этапы проектирования и конструирования, изготовления и эксплуатации и заканчивается ее утилизацией. Концепция ПЖЦ состоит в приоритете экологического фактора на всех этапах полного жизненного цикла машин. При этом эффективность утилизации машины по окончании срока ее эксплуатации лежит в основе мероприятий по обеспечению экологической безопасности, ресурсосбережения и работоспособности машины на всех этапах жизненного цикла.

Требования к экологической безопасности в сочетании с ресурсосбережением регламентированы в серии международных стандартов ISO 14000 «Система экологического управления». В основе этих требований лежит принцип «конструирование для экологии» (*Design for the Environment*), кото-

рый свидетельствует о важности экологического аспекта создания и функционирования машин, когда уже на этапе их проектирования планируются мероприятия по обеспечению экологической безопасности.

Работоспособность машины является комплексной характеристикой ее состояния и эффективности эксплуатации, которая зависит от многих факторов (организационных, материаловедческих, конструкторских, технологических и эксплуатационных). ***Уровень работоспособности и надежности закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и поддерживается при эксплуатации машины***, т.е. управление этими показателями осуществляется на всех этапах ее жизненного цикла.

Материал учебника базируется на лекционном курсе по дисциплине, который читается автором на протяжении ряда лет в Белорусском государственном университете транспорта, а также на материалах учебного пособия, изданного в 2011 году (Довгяло В. А. Методы повышения работоспособности машин и оборудования. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 231 с.) и существенно дополненного. В нем рассмотрены основные методы повышения работоспособности строительных, дорожных и путевых машин на различных этапах их создания и функционирования, включая ресурсосберегающие технологии и мероприятия по обеспечению работоспособности при проектировании, изготовлении и эксплуатации машин.

В целом же полный жизненный цикл машины включает следующие этапы:

- маркетинг;
- научно-исследовательскую работу по определению оптимальных показателей создаваемой машины, а также патентную проработку для оценки патентной чистоты концептуальных технических решений;
- проектирование и конструирование, включая разработку проекта экспериментальной машины, ее изготовление и испытания, внесение изменений в конструкцию и проектирование серийного образца с последующими испытаниями;
- производство машины, в том числе технологическую подготовку производства (сырье, комплектующие изделия, информационно-методическое обеспечение, технологическое оборудование и др.) и выпуск необходимой серии;
- эксплуатацию машины, которая включает комплекс технических обслуживаний, текущих и капитальных ремонтов для поддержания ее работоспособности;
- списание машины и ее утилизацию.

Структура учебника отражает основные тенденции обеспечения работоспособности машин с учетом их полного жизненного цикла. Материал разбит на разделы, в которых рассмотрены наиболее эффективные или пер-

спективные методы и средства повышения работоспособности и надежности деталей и конструкций машин на отмеченных этапах.

Анализу влияния различных факторов (организационных, материаловедческих, конструкторских, технологических и эксплуатационных) на работоспособность предшествует раздел, в котором рассмотрены основные факторы старения машин, а также характеристики надежности деталей и сборочных единиц машин.

В отдельные разделы выделены методология проектирования, отражающая важность выбора ресурсосберегающих параметров машины на стадии разработки проектно-конструкторской документации; материалы (композиты на полимерной и металлической матрице, адаптивные и наноматериалы и т.п.), обеспечивающие снижение металлоемкости машин; организационные мероприятия и технологические методы, способствующие реализации заданного уровня работоспособности машин при изготовлении; основные способы поддержания работоспособного состояния и методы восстановления деталей и конструкций при эксплуатации машин; способы утилизации машин и рециклинга материалов.

Выбор современных машиностроительных материалов, технологических процессов изготовления из них деталей и конструкций, конструктивных решений и организационных аспектов весьма обширен. Поэтому в учебнике основное внимание было уделено наиболее актуальным, на наш взгляд, разработкам. Вместе с тем, очевидно, что спектр современных методов повышения работоспособности машин не ограничивается приведенными в учебнике сведениями, а постоянно расширяется и совершенствуется. Поэтому будущий инженер-механик, специализирующийся в области проектирования, модернизации и эксплуатации строительных, дорожных, путевых машин, должен ориентироваться в тенденциях развития соответствующих областей машиностроения.

Автор надеется, что учебник поможет студентам, магистрантам и слушателям курсов повышения квалификации получить информацию о возможностях основных конструкционных и триботехнических материалов, ресурсосберегающих технологиях изготовления из них деталей и конструкций, традиционных и современных методах восстановления деталей, агрегатов и узлов машин с целью их оптимального использования в зависимости от условий эксплуатации, нагрузок и с учетом необходимости сбережения трудовых, материальных и энергетических ресурсов.

1

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ МАШИН

При выборе машин для дорожно-строительных, путевых и других работ, при разработке новой или модернизации серийной конструкции, при определении конкурентоспособности продукции машиностроения необходимо иметь представление о качестве и техническом уровне машины.

Качество машины – это совокупность ее свойств, обеспечивающих реализацию потребительских запросов с учетом назначения машины (в соответствии со стандартом ГОСТ 15467–79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения»).

Уровень качества является относительной характеристикой, которая основана на сравнении свойств машины данной модели с аналогичными свойствами базовой модели или машин других производителей. Если предполагается определить уровень качества и технический уровень проектируемой машины, то за базовый вариант принимают лучший отечественный или мировой образец, аналогичный по функциональному назначению. Если же необходимо проанализировать динамику изменения качества и технического уровня машин во времени, то за базовые образцы принимают машины предыдущих поколений.

Количественными показателями качества машины являются показатели свойств, которые могут быть единичными, комплексными и интегральными. Интегральный показатель качества дает представление о степени полезности данной машины по величине отношения суммарного экономического эффекта от ее эксплуатации к суммарным затратам на ее создание и эксплуатацию.

Качество и технический уровень машины характеризуются широким спектром свойств, которые обуславливают ее пригодность удовлетворять требованиям потребителя, которые постоянно расширяются и усложняются.

Нормативно-техническая база транспортно-технологических машин (строительных, дорожных, путевых и др.) – это постоянно изменяющийся и совершенствующийся комплекс требований, которые охватывают социальные, технико-экономические, конструктивные, технологические, эксплуатационные и иные аспекты. Помимо традиционных требований, связанных с работоспособностью машин при эксплуатации, следует учитывать необхо-

димось утилизации машин после их списания (в частности, нормированный международными стандартами очень высокий процент утилизации и повторного использования материалов и конструкций).

Таким образом, *современные требования* относятся к различным аспектам *безопасного функционирования системы «оператор – машина – среда»*. В целом их можно свести к решению нескольких концептуальных проблем:

- реализации высокого уровня безопасности эксплуатации машин, в том числе экологической;
- минимизации трудо-, энерго- и материальных затрат при проектировании, изготовлении, эксплуатации и утилизации машин;
- обеспечения высокого качества работ;
- обеспечения высокой производительности работ;
- достижения заданных международными стандартами норм по утилизации и рециклингу машин;
- формирования дизайна машин, отвечающего современным эргономическим и эстетическим представлениям.

Набор показателей качества и технического уровня машины зависит от ее назначения и, в частности, от *главного параметра машины*. Так, для землеройных машин с ковшовым рабочим органом главный параметр – это вместимость ковша; для землеройно-транспортных с отвальным рабочим органом – тяговое усилие и длина отвала; для дробильных машин – вместимость камеры дробления; для уплотняющих машин (катков) – ширина вальца и т.д.

В общем случае *показатели, определяющие качество и технический уровень машин*, можно условно разделить на следующие группы:

- *конструктивные*, которые характеризуют качество и свойства конструкции машины (надежность, безопасность, эргономика, унификация и стандартизация деталей и сборочных единиц и др.);
- *экологические*, учитывающие механическое, физическое и химическое воздействие машины на окружающую среду;
- *эксплуатационные*, отражающие работу машины в производственных условиях (производительность, типоразмер, мобильность, проходимость, универсальность и др.);
- *технические*, связанные с основными техническими параметрами (мощностью, массой, удельной энерго- и материалоемкостью и др.);
- *экономические*, характеризующие эффективность машин по основным экономическим параметрам (стоимость машиностроения, выработка и др.);
- *технологические*, связанные с технологичностью конструктивных решений, т. е. соответствием конструкции машины технологическим требованиям, которые обеспечивают минимальную материалоемкость, трудоемкость и себестоимость ее изготовления при сохранении необходимых эксплуатационных свойств (в том числе с производственной, эксплуатационной и ремонтной технологичностью конструкции);

– *утилизационные*, которые отражают способность материалов деталей и конструкций к переработке и вторичному использованию после списания машин;

– *патентно-правовые*, характеризующие патентную чистоту и новизну технических решений.

Перечисленные характеристики машин способствуют выполнению основных требований потребителей машиностроительной продукции. Они отражают как эффективность создания и функционирования машин, так и эффективность их утилизации, т. е. способность материалов и конструкций к повторному использованию.

Как и любая другая, эта классификация в известной мере условна, поскольку многие показатели машин можно причислить сразу к нескольким группам. Между тем она позволяет с общих позиций рассмотреть качество и технический уровень анализируемых машин.

Из требований, которые охватывают проблему обеспечения работоспособности машин, наиболее значимым является *безопасность эксплуатации* машин, которая регламентирована нормативно-техническими правовыми актами в области технического нормирования и стандартизации. Эти документы определяют критерии безопасности машин и включают требования:

- к безопасности машин в целом;
- к безопасному управлению машиной и рабочему месту оператора;
- к безопасной эксплуатации привода, включая силовую установку, передачи, электро-, пневмо- и гидросистемы;
- безопасности к рабочим органам, ходовой части и др.

Различают активную и пассивную безопасность. Активная безопасность базируется на комплексе эксплуатационных и технических характеристик, способствующих предотвращению аварийных ситуаций. К ним относятся тормозные и динамические свойства, устойчивость против заносов и опрокидывания, обзорность, обеспеченность устройствами и приборами, предупреждающими о критических ситуациях, надежность элементов конструкции, разрушение которых может привести к неблагоприятным последствиям, обеспеченность световой и звуковой сигнализацией, а также автоматическими системами безопасности и блокировки.

Пассивная безопасность включает комплекс конструктивных мер, исключающих или уменьшающих возможность возникновения аварийных ситуаций. В их числе обеспечение необходимой прочности и жесткости конструкции кабины и защитных элементов, применение безосколочных стекол, предотвращение самопроизвольного открывания дверей, отсутствие в кабине выступающих частей с острыми кромками и углами, наличие предохранительных ремней и др.

Что касается **безопасности системы управления** машины, то она во многом связана с учетом эргономических факторов при разработке конструкции машины. В их числе:

- пространственная организация рабочего места оператора, включая обеспечение широкого обзора за зоной рабочего процесса и окружающей территорией;

- удобное расположение рабочего места машиниста и пульта управления;

- оснащение рабочего места оператора активной вибрационной защитой от низко- и высокочастотных колебаний;

- поддержание параметров среды с учетом физиологических возможностей человека, в том числе оснащение кабины системой кондиционирования и очистки воздуха, обеспечивающей заданный уровень температуры и влажности воздушной среды, а также допустимое содержание вредных примесей;

- ограничения звука и шума, а также времени их воздействия, установленные нормативными документами.

Помимо отмеченных эргономических факторов, имеются мероприятия специального назначения, обеспечивающие безопасность рабочего процесса с учетом назначения машины.

Экологические характеристики машин связаны с охраной окружающей среды и минимизацией их вредного воздействия при эксплуатации. В их числе параметры, характеризующие интенсивность механического воздействия рабочих органов и движителей машин на почву и растительность, включая давление на растительный покров; показатели выбросов вредных веществ (газов, частиц и т.п.), а также количество топливно-смазочных материалов, попадающих в почву при хранении и эксплуатации машин, и др.

Эксплуатационные характеристики машины определяются ее назначением, типоразмером главного параметра и производительностью, наличием и спектром сменного рабочего оборудования, скоростью его замены и установки; типом и конструктивными особенностями ходового оборудования, размером колеи и базы, дорожным просветом и габаритами, рабочими и транспортными скоростями; простотой и удобством технического обслуживания и ремонта и др.

Комплексной характеристикой, отражающей эффективность эксплуатации машины, является ее **производительность**. Она представляет собой количество продукции, выраженное в единицах объема, массы, площади или длины, которое машина производит в единицу времени (например, количество вынутого, перемещенного или уложенного грунта в м³/ч или т/ч; площадь уплотненной поверхности в м²/ч; протяженность разработанной траншеи в м/ч и др.).

Различают теоретическую, техническую и эксплуатационную производительность.

Теоретическая (расчетная) производительность $\Pi_{\text{теор}}$ определяется конструктивными параметрами машины и свойствами среды, с которой машина взаимодействует.

Для машин *циклического действия* производительность ($\text{м}^3/\text{ч}$ или $\text{т}/\text{ч}$)

$$\Pi_{\text{теор}} = V/T_{\text{ц}}$$

или (1.1)

$$\Pi_{\text{теор}} = V\rho/T_{\text{ц}},$$

где V – объем материала, м^3 ;

ρ – его плотность, $\text{т}/\text{м}^3$;

$T_{\text{ц}}$ – время цикла, ч.

Для машин *непрерывного действия* производительность ($\text{м}^2/\text{ч}$ или $\text{т}/\text{ч}$)

$$\Pi_{\text{теор}} = Bv,$$

или (1.2)

$$\Pi_{\text{теор}} = Fv,$$

где B – ширина захвата материала рабочим органом машины, м;

F – расчетное сечение потока материала, м^2 ;

v – расчетная рабочая скорость перемещения машины или материала, м/ч.

Техническая производительность ($\Pi_{\text{тех}}$) учитывает потери и изменение структуры материала (разрыхление, уплотнение и т.п.), снижение эффективной мощности и скорости рабочих операций, а также степень использования рабочего оборудования (наполнение ковшей, отвалов, бункеров, цистерн; перекрытие проходов машины):

$$\Pi_{\text{тех}} = (k_1 k_2 \dots k_n) \Pi_{\text{теор}},$$
(1.3)

где k_i ($i = 1, \dots, n$) – коэффициент, учитывающий упомянутые потери и изменения мощности, скорости, структуры материала и др.

Эксплуатационная производительность – это наиболее близкая к фактической, учитывающая объективные потери рабочего времени машины за час, смену или год (на техобслуживание, ремонт, заправку топливом, перемещение и др.). Эти потери оценивают коэффициентом использования машины по времени $k_{\text{в}}$ ($k_{\text{в}} = 0,80 \dots 0,90$). Тогда эксплуатационная производительность

$$\Pi_3 = \kappa_B \Pi_{\text{тех}}. \quad (1.4)$$

Из *технических характеристик* наиболее общими и значимыми для транспортно-технологических машин, независимо от их назначения, являются параметры, связывающие мощность, массу и производительность и характеризующие энергетические и материальные ресурсы, приходящиеся на единицу вырабатываемой продукции (в смену).

Удельная энергоёмкость (или удельная мощность)

$$N_{\text{уд}} = N / \Pi_3, \quad (1.5)$$

где N – суммарная мощность установленных на машине двигателей;

Π_3 – сменная эксплуатационная производительность.

Удельная материалоемкость

$$m_{\text{уд}} = m / \Pi_3, \quad (1.6)$$

где m – масса машины.

Соответственно, чем меньше значения $N_{\text{уд}}$ и $m_{\text{уд}}$, тем выше уровень энерго- и материалосбережения.

Эффективность новой модели машины по фактору ресурсосбережения можно оценить по сравнительным характеристикам, сопоставляя ее показатели с аналогичными характеристиками базовой модели. За критерий сопоставления можно взять удельные показатели энерго- и материалоемкости в натуральных единицах измерений:

$$\begin{aligned} \Delta N_{\text{уд}} &= N_{\text{уд}}^{\text{нов}} - N_{\text{уд}}^{\text{б}} ; \\ \Delta m_{\text{уд}} &= m_{\text{уд}}^{\text{нов}} - m_{\text{уд}}^{\text{б}} , \end{aligned} \quad (1.7)$$

где $N_{\text{уд}}^{\text{нов}}$, $N_{\text{уд}}^{\text{б}}$ – мощность силовой установки новой и базовой моделей машины, кВт;

$m_{\text{уд}}^{\text{нов}}$, $m_{\text{уд}}^{\text{б}}$ – масса новой и базовой моделей машины, кг.

Кроме того, в качестве показателя эффективности можно использовать относительные характеристики энерго- и материалоемкости:

$$\begin{aligned} \Delta N_{\text{уд}} &= \frac{N_{\text{уд}}^{\text{нов}} - N_{\text{уд}}^{\text{б}}}{N_{\text{уд}}^{\text{б}}} \cdot 100 \% ; \\ \Delta m_{\text{уд}} &= \frac{m_{\text{уд}}^{\text{нов}} - m_{\text{уд}}^{\text{б}}}{m_{\text{уд}}^{\text{б}}} \cdot 100 \% . \end{aligned} \quad (1.8)$$

Этими критериями можно также воспользоваться для оценки эффективности модернизации или реконструкции машины, сопоставляя абсолютные

и относительные показатели удельной энерго- и материалоемкости машины до и после модернизации.

К этим показателям следует добавить энергонасыщенность машины E , которая характеризует ее удельные энергетические возможности:

$$E = N / m. \quad (1.9)$$

Экономические характеристики включают стоимость машино-смены, которая зависит от расхода топливно-смазочных материалов, расходов на техническое обслуживание и ремонт, выработку и др. В числе значимых показателей:

– *себестоимость механизированных работ*

$$C_{уд} = C / П_э, \quad (1.10)$$

где C – стоимость машино-смены (т.е. сумма затрат по эксплуатации машины за смену);

– *выработка на одного рабочего*

$$П_{уд} = П_э / n_p, \quad (1.11)$$

где n_p – число рабочих, занятых управлением и обслуживанием машины;

– *топливная экономичность* машины, которую оценивают по удельному расходу топлива:

– *на единицу мощности* двигателя (кг/кВт·ч) –

$$G_{уд} = 1000G / N, \quad (1.12)$$

– *на единицу выработанной продукции* –

$$G_{уд} = 1000G / П_{тех}, \quad (1.13)$$

где G – часовой расход топлива, кг/ч;

$П_{тех}$ – техническая производительность (в натуральных показателях).

Технологические свойства обеспечивают оптимальные затраты материалов, средств, труда и времени при подготовке производства, изготовлении деталей и конструкций, сборке агрегатов, узлов и машины в целом, а также при эксплуатации машины. Количественно технологические свойства характеризуются рядом показателей, в числе которых трудоемкость изготовления деталей и сборочных единиц, технологическая себестоимость, коэффициент использования материала и коэффициенты унификации деталей и конструкций.

В частности, *коэффициенты унификации деталей* $K_{y,d}$ и конструктивных элементов $K_{y,э}$ машины определяют из выражений

$$K_{y,d} = D_y / D, \quad K_{y,э} = Q_{y,э} / Q_э, \quad (1.14)$$

где D_y , D – число унифицированных и общее число деталей в машине;
 $Q_{y.э}$, $Q_э$ – число унифицированных и общее число конструктивных элементов в машине.

Утилизационные свойства материалов предопределяют их способность к переработке и повторному применению после списания машины. Для эффективной переработки материалов деталей и конструкций, упрощения разборки и последующего расчленения машины после списания на сборочные единицы и детали, а также на материалы различной природы и свойств (сплавы цветных и черных металлов, стекло, дерево, композиты на основе полимеров и др.) руководствуются следующими рекомендациями:

- используют рециклируемые и рециклированные материалы для деталей и конструкций машин;
- разрабатывают конструкции сборочных единиц и агрегатов, обеспечивающие при утилизации машины простое и удобное разделение различных по природе материалов;
- упрощают разборку и замену узлов за счет разработки модульных конструкций машин с повторным использованием отдельных узлов машины после их восстановления;
- минимизируют образование отходов и повторно используют их (в том же производственном цикле);
- разрабатывают технологии, снижающие энергоемкость утилизации и уменьшающие выбросы вредных веществ.

Эффективность утилизации машин и рециклинга материалов после списания является непременным условием обеспечения конкурентоспособности продукции машиностроения.

Патентно-правовые свойства характеризуют патентную чистоту и новизну технических решений и являются правовой базой конкурентоспособности машины на внешнем рынке. Качество и технический уровень создаваемой машины должны быть подкреплены правовыми документами (патентами на изобретения), подтверждающими новизну и высокий изобретательский уровень технических решений. В связи с этим необходимо проведение патентных исследований в соответствии с требованиями стандарта СТБ 1180–99 «Патентные исследования. Содержание и порядок проведения», конечной целью которых является определение патентоспособности технических решений и обоснование целесообразности правовой защиты.

При планировании тематики патентный поиск проводят для выявления новизны поставленной технической задачи, наличия смежных технических решений, охраняемых патентами, а также перспективности разработки.

При проведении научных исследований по выбранной тематике отбирают наиболее эффективные имеющиеся технические решения в качестве аналогов и прототипов и определяют патентоспособность предлагаемых технических решений.

При наличии серьезных перспектив реализации новых машин на внешнем и внутреннем рынках необходима их патентная чистота (независимость от охраняемых прав третьих лиц на объекты промышленной собственности), которая достигается, если технические решения (общая схема машины, конструкции ее основных сборочных единиц, материалы, технологические процессы):

- запатентованы разработчиком и производителем продукции;
- выполнены в соответствии с лицензиями других патентообладателей;
- являются общеизвестными и не подлежащими патентованию.

Проверка патентной чистоты машин, выпускаемых отечественными предприятиями, является обязательной на стадии постановки продукции на производство.

Рассмотренные свойства дают всестороннюю информацию о машинах. Однако многие из них, связанные с экономическими показателями, в том числе эксплуатационными расходами, в условиях рынка являются коммерческой тайной. Поэтому производители машин, как правило, выносят на всеобщее обозрение набор характеристик, которые дают представление только о технических и технологических возможностях машин.

Отечественные машины должны соответствовать мировому уровню или превосходить его, обладая набором перечисленных свойств. В качестве примера в таблице 1.1 приведены технические характеристики одноковшовых экскаваторов ведущих производителей Европы, Азии и США. Их основные параметры (масса и габаритные размеры экскаватора, мощность двигателя и характеристики гидросистемы, параметры рабочей зоны, характеристики механизмов хода и поворота) имеют очень высокие показатели. Машины обладают высоким уровнем экономичности, эргономичности и экологической безопасности. Практически все они снабжены энергосберегающими системами электронного управления, автоматически обеспечивающими оптимальное использование мощности двигателя при различных режимах земляных работ, т. е. высокий уровень основных технических характеристик присущ всем приведенным машинам.

Как видно из таблицы, машины ведущих производителей имеют незначительные отклонения технических характеристик. Вместе с тем их стоимость существенно различается.

Таблица 1.1 – Основные параметры гидравлических одноковшовых экскаваторов*

Параметр	АО «КЭЗ», ЭО-4225А	ATLAS, 1704LC	CASE POCLAIN, 1288LC	CATERPIL LAR, 325GM	DAEWOO, SOLAR 280LC	KOBELCO, SK300	KOMATSU, PC300	SAMSUNG, SE2280	HITACHI, FH-270.3	HYUNDAI, ROBEX 290	KATO, HD 12.50
Масса экскаватора, т	26,45	24,2	26,2	25,8	28,0	29,2	30,7	26,6	26,0	27,0	29,5
Мощность двигателя, кВт	125,0	125,0	127,6	125,1	141,0	169,0	154,0	132,5	122,0	145,0	161,9
Рабочее давление, МПа	28,0	32,0	35,0	32,0	30,0	30,0	32,5	32,0	28,5	32,0	28,5
Максимальная подача насоса, л/мин	400	630	585	420	500	630	500	520	524	514	582
Максимальное усилие резания, кН	149,0	172,0	184,5	149,0	174,3	201,0	175,3	166,0	154,9	167,0	173,0
Тяговое усилие, кН	210	200	197	216	263	270	234	240	214	267	197
Преодолеваемый уклон, град	35,0	35,0	38,7	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0
Давление на грунт, МПа	0,054	0,050	0,053	0,049	0,054	0,061	0,065	0,056	0,054	0,056	0,061
Скорость передвижения, км/ч	3,6	4,5	4,0	4,6	5,0	5,5	5,5	4,4	4,0	4,6	5,5
Частота вращения поворотной платформы, мин ⁻¹	9,1	9,0	12,1	10,3	12,1	10,5	10,0	9,7	12,0	10,2	10,0
Вместимость ковша, м ³	1,11	1,0	1,24	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1	0,9	1,1	1,2
Глубина копания, м	6,0	6,95	6,4	6,9	6,67	6,79	6,7	7,0	6,54	7,04	6,71
Радиус копания, м	9,30	10,15	9,9	10,19	10,2	10,6	10,55	10,22	10,06	10,36	10,59
Высота выгрузки, м	5,15	6,35	6,5	6,54	6,7	6,95	6,89	6,78	6,67	6,95	7,11
Задний радиус, мм	3280	2750	2900	3050	3200	3200	3225	2970	3010	3150	3460
База, мм	3700	3720	3750	3795	4010	3705	3640	3620	3710	3710	3710
Габаритные размеры, мм: длина	10250	9450	10000	10270	10740	10850	10855	10420	10450	10630	11150
ширина	3000	3000	3170	3050	3190	3200	3190	3190	3000	3200	3200
высота	3290	3000	3500	3190	3280	3200	3425	3340	3170	3320	3200

* Четвертая размерная группа, гусеничная ходовая система, рабочее оборудование – обратная лопата.

Поэтому выбор потребителем наиболее выгодной модели машины (в данном случае одноковшового экскаватора) базируется, как правило, на учете экономических факторов, к которым относятся удельные приведенные затраты на разработку грунта, стоимость машино-смены, стоимость топлива, расходуемого за смену, а также характеристик ресурсосбережения, которые можно определить по формулам (1.5)–(1.8), (1.10) и (1.11).

Качество и технический уровень машин закладываются на этапе их создания, особенности которого регламентированы в стандарте СТБ 1218-2000 «Разработка и постановка продукции на производство». Стандарт, в свою очередь, опирается на нормативные документы, охватывающие все этапы жизненного цикла машин. В трактовке этого стандарта *жизненный цикл* машины – это совокупность взаимосвязанных процессов последовательного изменения состояния машины от формирования исходных требований к ней до утилизации.

На начальной стадии заказчик делает заявку на работу, на основании которой разработчик производит *аванпроект* с целью технико-экономического обоснования целесообразности создания машины и путей ее производства и эксплуатации. Далее разработчиком формируется *техническое задание* на опытно-конструкторскую работу, т.е. исходный технический документ, который разрабатывается на основании требований заказчика (заявки, аванпроекта, результатов выполненных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ). В нем устанавливается комплекс требований к машине, а также к содержанию, объему и срокам проведения работ, включая стадии разработки конструкторской документации, порядок контроля и приемки машины.

Стадии выполнения конструкторской документации включают техническое предложение, эскизный и технический проекты, рабочую конструкторскую документацию.

На основании анализа технического задания разрабатывают *техническое предложение*, которое представляет собой проектно-конструкторскую документацию, содержащую технико-экономическое обоснование целесообразности разработки машины и уточняющую требования к машине, полученные после проработки вариантов возможных технических решений.

Далее следует разработка проектно-конструкторской документации в виде эскизного и технического проекта. *Эскизный проект* содержит принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление о конструкции и принципе работы машины. *Технический проект* содержит окончательные технические решения, дает полное представление о конструкции разрабатываемой машины и включает данные, необходимые и достаточные для разработки рабочей конструкторской документации. *Рабочая документация* представляет собой совокупность конструкторских документов, предназначенных для изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуа-

тации и ремонта машины. В их числе *производственная документация*, предназначенная для изготовления, контроля, приемки и поставки машины; *эксплуатационные документы*, предназначенные для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте машины в процессе эксплуатации; *ремонтные документы*, содержащие сведения о проведении ремонтных работ на специализированных предприятиях.

Помимо конструкторской документации, разработчик предоставляет заказчику информационную документацию, которая содержит карту технического уровня и качества продукции, патентный формуляр, карту расчета экономической эффективности, протоколы испытаний, а также результаты нормоконтроля и технологического контроля на всех стадиях проектирования.

Контрольные вопросы к разделу 1

- 1 Дайте определение качества машины.
- 2 Назовите показатели, определяющие качество и технический уровень машин.
- 3 Какие характеристики машин оказывают влияние на активную и пассивную безопасность их эксплуатации?
- 4 В чем состоят различия между расчетной, технической и эксплуатационной производительностью?
- 5 Как определить производительность для машин непрерывного и циклического действия?
- 6 Какие параметры ресурсоемкости связаны с производительностью машины?
- 7 Назовите основные направления ресурсосбережения в машиностроении.
- 8 Как оценить эффективность модернизации машины по потреблению материальных и энергетических ресурсов?
- 9 Назовите мероприятия, повышающие эффективность утилизации машин.
- 10 Что такое удельная энергоемкость и удельная материалоемкость машины?
- 11 Для чего проводят патентные исследования при создании новых машин?
- 12 В каких случаях достигается патентная чистота технических решений, используемых при создании машины?

2 РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАШИН

Работоспособность машины зависит от надежности ее деталей, сборочных единиц и агрегатов. Она существенно влияет на производительность работ, продолжительность и трудоемкость технического обслуживания и ремонта, потребность в запасных частях и материалах для производства ремонтных работ и, в конечном счете, на себестоимость машины. Управление надежностью осуществляется на всех этапах ее создания и функционирования. *Надежность закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и поддерживается при эксплуатации машины.*

2.1 Показатели надежности

Надежность – это свойство машины выполнять заданные функции, сохраняя во времени эксплуатационные показатели в заданных пределах в соответствии с условиями работы, технического обслуживания (ТО), текущего ремонта (ТР), хранения и транспортирования (ГОСТ 27.002–89). Она оказывает влияние на эксплуатационные, технологические и технико-экономические показатели машин. Выбор оптимального уровня надежности является важной задачей, поскольку при недостаточной надежности резко возрастают затраты на техническое обслуживание и ремонт машины, а при избыточной – снижается эффективность ее использования и происходит перерасход ресурсов.

Надежность характеризуется свойствами, которые способствуют сохранению работоспособности машины при эксплуатации: безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.

Безотказность – свойство машины непрерывно сохранять работоспособность в течение наработки (или времени) до отказа (или планового ТО), т.е. оно характеризует время эксплуатации машины до отказа или планового ТО. Это свойство связано с сопротивляемостью элементов конструкции машины механическому разрушению, износу и коррозии, а также со стабильностью эксплуатационных свойств конструкционных, триботехнических и других материалов.

Наработка может быть выражена в продолжительности эксплуатации машины или в объемах выполненной работы (в единицах массы, объема,

площади или других единицах). В большинстве случаев наработку выражают в единицах времени эксплуатации машины до отказа.

Безотказность имеет большую значимость для машин, которые эксплуатируются в составе комплектов или комплексов, остановка одной из которых вследствие отказа может нарушить технологический процесс в целом и тем самым нанести существенный экономический ущерб. В качестве примера можно привести технологию устройства усовершенствованных капитальных асфальтобетонных покрытий при помощи комплекса соответствующих машин.

Долговечность – свойство машины сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе ТО и ТР.

В отличие от безотказности долговечность характеризует продолжительность работы машины по суммарной наработке, которая прерывается периодами для восстановления ее работоспособности при плановых и внеплановых ремонтах, а также при техническом обслуживании, т.е. долговечность количественно выражают временем эксплуатации машины до капитального ремонта или до списания машины.

Предельное состояние машины – это состояние, при котором ее дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена. Причинами прекращения работы могут быть следующие обстоятельства:

- неустранимое ухудшение требований безопасности;
- недопустимое ухудшение параметров по сравнению с заданными значениями;
- недопустимое снижение эффективности эксплуатации;
- необходимость проведения капитального ремонта.

За *критерий предельного состояния* принимают признаки существенно нарушения работоспособности машины. Для машины в целом к ним относится необходимость:

- ремонта или замены нескольких составных частей машины;
- полной разборки машины из-за повреждения базовой сборочной единицы (например, несущей рамной конструкции).

Для узлов и агрегатов машины критериями предельного состояния может служить необходимость:

- замены или трудоемкого ремонта корпусной детали;
- замены или ремонта нескольких основных деталей;
- трудоемкого ремонта при выходе одного из основных параметров функционирования машины за пределы, установленные нормативно-технической документацией.

Количественная оценка выбранного критерия, как правило, базируется на требованиях нормативно-технической документации и зависит от характера отказа.

Последствием достижения предельного состояния деталей является их замена, а машины (и ее узлы и агрегатов) – капитальный ремонт или списание.

Следует отметить, что для невосстанавливаемых деталей и сборочных единиц понятия безотказности и долговечности практически совпадают.

Ремонтопригодность – приспособленность машины к предупреждению и обнаружению причин возникновения ее отказов (повреждений) и устранению их последствий путем ТО и ТР.

Количественно ремонтпригодность выражают временем ремонта при восстановлении, начиная с обнаружения причины отказа и кончая его устранением, т.е. возвращением машине работоспособного состояния.

Ремонтопригодность машины зависит от многих факторов, в том числе:

- от блочно-агрегатной компоновки, т. е. возможности монтажа-демонтажа агрегата без его предварительной разборки или смежного с ним узла;
- легкосъемности при замене агрегатов (с минимальными затратами времени и труда);
- доступности проведения осмотра и работ по регулировке и замене деталей;
- контролепригодности (возможности контроля технического состояния машины при ТО, а также поиска причины отказа с помощью диагностической аппаратуры);
- взаимозаменяемости деталей и узлов, которая характеризуется объемами пригоночных работ;
- степени унификации.

Сохраняемость – свойство машины непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние при хранении и транспортировании. Она характеризует способность машины противостоять отрицательному воздействию факторов ее длительного хранения и транспортирования (влаги, облучения, загрязненности и температуры окружающей среды и др.), а также обеспечить сохранение показателей безотказности и долговечности.

Высокие показатели сохраняемости достигаются при использовании защитных лакокрасочных и полимерных покрытий, герметиков и упаковочных пленок, специальных заглушек и пробок, установкой опорных приспособлений, хранением в ангарах и других закрытых помещениях.

Различают исправное и неисправное, работоспособное и неработоспособное состояния машины.

В *исправном состоянии* машина соответствует всем требованиям нормативно-технической документации, в *неисправном* – не соответствует хотя бы одному из них.

В *работоспособном состоянии* машина способна выполнять заданные функции и сохранять значения всех параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией, в *неработоспособном* – не способна выполнять заданные функции, если хотя бы один параметр не соответствует этим требованиям.

Как видно из этих определений, исправность как понятие шире, чем работоспособность. Исправная машина должна удовлетворять всем требованиям нормативно-технической документации, а работоспособная – только тем, которые обеспечивают ее нормальное функционирование, т. е. машина может быть работоспособной, но неисправной (например, машина с вмятиной на капоте).

Наглядное представление о надежности машины дает график ее эксплуатации (рисунок 2.1), на котором показаны периоды наработки (эксплуатации) t_n , ремонта t_p и технического обслуживания $t_{то}$, т. е. периоды работоспособного и неработоспособного состояний машины. Они могут различаться по продолжительности и чередованию, что дает информацию о показателях надежности машины. В частности, участки t_n характеризуют ее безотказность: чем они длиннее, тем выше безотказность. Участки t_p и $t_{то}$ свидетельствуют о ремонтпригодности машины (с их уменьшением ремонтпригодность возрастает). И, наконец, с увеличением общей длины участков $(t_n + t_p)$ и $(t_n + t_{то})$ растет долговечность машины, которую характеризует время от начала эксплуатации (от 0) до достижения предельного состояния $t_{пред}$.

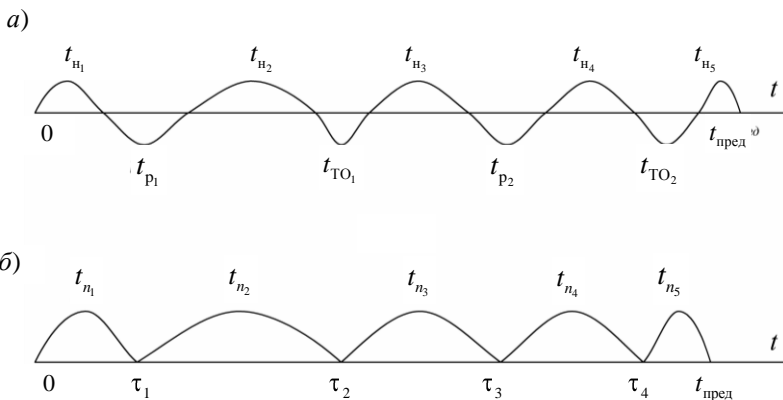


Рисунок 2.1 – Графики эксплуатации (а) и потока отказов элементов (б) машины:
 t_{ni} – период времени наработки; t_{pi} – период времени ремонта при возникновении отказа;
 t_{toi} – период времени технического обслуживания; τ_i – моменты отказов; $t_{пред}$ – момент наступления предельного состояния

Для оценки надежности машины используют различные единичные и комплексные показатели. Эффективность ее эксплуатации зависит от показателей надежности, которые характеризуют длительность периодов эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, а также от затрат на поддержание работоспособного состояния при эксплуатации.

Поэтому для решения практических задач в качестве основных характеристик надежности целесообразно использовать следующие показатели:

- средний срок службы;
- средний и гамма-процентный ресурсы до капитального ремонта или до списания;
- вероятность безотказной работы и среднюю наработку до отказа или на отказ;
- интенсивность отказов или параметры потока отказов;
- среднее время восстановления работоспособного состояния;
- средний и гамма-процентный сроки сохраняемости;
- коэффициент технического использования и коэффициент готовности.

Из перечисленных характеристик к показателям надежности, присущим только *восстанавливаемым* элементам, относятся средняя наработка на отказ, наработка между отказами, среднее время восстановления.

Ресурсные показатели характеризуют *долговечность машин* и их элементов.

Средний срок службы – это календарная продолжительность эксплуатации машины от ее начала (или возобновления эксплуатации после ремонта), включая простои и перерывы в работе, до достижения предельного состояния, которая измеряется в календарных единицах.

Ресурс – это только наработка машины от начала ее эксплуатации (или возобновления после ремонта) до перехода в предельное состояние. *Средний ресурс до капитального ремонта* представляет собой среднее значение наработки от начала эксплуатации машины до первого капитального ремонта. Соответственно, *средний ресурс до списания* – это среднее значение наработки от начала эксплуатации машины до ее списания.

Таким образом, срок службы машины – это продолжительность ее существования, включая эксплуатацию, а ресурс – время только эксплуатации (в этом и состоит различие этих понятий).

Статистическая оценка среднего ресурса до капитального ремонта (или до списания) N машин

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i, \quad (2.1)$$

где T_i – величина ресурса i -й машины.

Гамма-процентный ресурс T_γ – это наработка, в течение которой машина не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов ($\gamma, \%$). По существу регламентированная вероятность γ – это заданный процент машин, каждая из которых достигает установленного ресурса T_γ . Он определяется по формуле

$$P(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100}. \quad (2.2)$$

Безотказность машин характеризует следующая группа показателей. *Вероятность безотказной работы* – это вероятность того, что в пределах заданной наработки не произойдет отказа машины. Ее можно оценить из выражения

$$P(t) = \frac{1}{N}(N - n), \quad (2.3)$$

где N – общее число машин, работоспособных в начальный момент времени;
 n – число машин, отказавших ко времени t .

Средняя наработка на отказ – это отношение наработки *восстанавливаемой* машины к математическому ожиданию (среднему значению) числа ее отказов в период этой наработки, т.е. это среднее время безотказной работы или среднее значение наработки между отказами. Статистическую наработку восстанавливаемых машин на отказ можно определить по формуле

$$T_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (2.4)$$

где $\sum_{i=1}^N t_i$ – суммарная наработка восстанавливаемых машин;

N – суммарное число их отказов.

Средняя наработка до отказа – это математическое ожидание (среднее значение) наработки *невосстанавливаемого* элемента машины до первого отказа. Статистически наработку до первого отказа определяют из выражения

$$T_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{1i}, \quad (2.5)$$

где t_{1i} – наработка до первого отказа i -го элемента;

$\sum_{i=1}^N t_{1i}$ – суммарная наработка неремонтируемых элементов до отказа;

N – общее число этих элементов.

Эта характеристика невосстанавливаемых элементов соответствует показателю средней наработки на отказ восстанавливаемых элементов.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это вероятность отказа невосстанавливаемого элемента, т.е. отношение среднего числа Δn элементов, отказавших в единицу времени Δt , к числу элементов N_p , сохранивших работоспособность. Статистическая оценка $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t} \frac{1}{N_p}.$$

Как правило, для многих элементов машин зависимость интенсивности отказов от времени наработки имеет вид, представленный на рисунке 2.2.

Время наработки можно условно разбить на три этапа. На первом этапе, который характеризуется повышенной интенсивностью отказов, происходит приработка и выявление скрытых дефектов, как конструктивных, так и технологических. Часто окончание приработочного этапа связывают с завершением гарантийного обслуживания машин

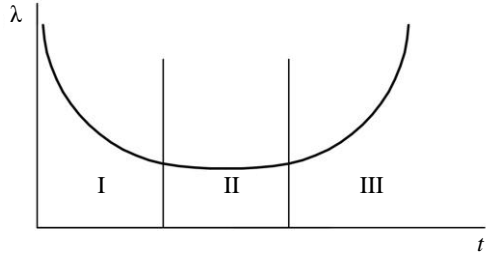


Рисунок 2.2 – Зависимость интенсивности отказов от времени наработки

предприятием-изготовителем. На втором этапе реализуется режим стабильной работы, для которого характерна постоянная интенсивность отказов, носящих случайный характер. При этом время появления отказов не связано с предыдущей наработкой. И, наконец, на третьем этапе – этапе усиленного старения – увеличивается интенсивность отказов вплоть до достижения предельного состояния из-за массового числа отказов вследствие износа, усталостного разрушения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией. С учетом всех этих факторов ресурсом машины считают, как правило, границу между вторым и третьим этапами наработки.

Ремонтопригодность машин и их элементов характеризует среднее время восстановления работоспособного состояния (математическое ожидание времени восстановления работоспособности), т. е. это время вынужденного нерегламентированного простоя, необходимого для поиска и обнаружения отказа. Статистически среднее время восстановления определяют по формуле

$$T_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{bi}, \quad (2.6)$$

где N – общее число восстанавливаемых машин;

t_{bi} – время восстановления i -й машины.

Сохраняемость характеризуют несколько временных показателей.

Средний срок сохраняемости – это математическое ожидание срока хранения машины.

Гамма-процентный срок сохраняемости – это срок сохраняемости, достигаемый машиной с заданной вероятностью γ процентов ($\gamma, \%$).

Помимо указанных единичных показателей используют комплекс-

ные показатели надежности машин. К их числу относятся коэффициенты технического использования и готовности.

Коэффициент технического использования $k_{ти}$ статистически равен отношению суммарного времени пребывания машин в работоспособном состоянии к суммарному времени их эксплуатации, включающему периоды пребывания машины в работоспособном состоянии и периоды простоев:

$$k_{ти} = \frac{t_n}{t_n + t_p + t_{то}}, \quad (2.7)$$

где t_n – суммарная наработка (пребывание в работоспособном состоянии) всех машин;

t_p – суммарное время простоев при проведении плановых и внеплановых ремонтов всех машин;

$t_{то}$ – суммарное время простоев при проведении всех видов технического обслуживания машин.

Коэффициент готовности k_r характеризует вероятность того, что машина окажется работоспособной в произвольный момент времени, кроме периодов выполнения планового технического обслуживания.

Статистически k_r равен отношению времени безотказной работы к сумме времени безотказной работы и времени на восстановление (исключая время на плановые ремонты и техническое обслуживание):

$$k_r = \frac{T_o}{T_o + T_b}, \quad (2.8)$$

где T_o – среднее время безотказной работы;

T_b – среднее время восстановления.

Из выражений (2.7) и (2.8) следует: чем меньше суммарные простои, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом, и среднее время восстановления, тем выше коэффициенты $k_{ти}$ и k_r . Соответственно, увеличение коэффициентов технического использования и готовности способствует сбережению ресурсов при эксплуатации машин.

2.2 Основные факторы физического старения машин

Надежность характеризует способность машины сохранять во времени свои технические характеристики и эксплуатационные показатели. Вместе с тем со временем под воздействием механических нагрузок, окружающей среды, перепадов температуры и радиации происходит старение ее элементов, что сопровождается ухудшением функциональных свойств, вплоть до перехода машины в неработоспособное или предельное состояние.

Различают две *формы старения*:

1) моральное, которое состоит в том, что со временем технико-экономические характеристики машины становятся хуже исходных, которыми она располагала на момент поступления потребителю;

2) физическое, которое является результатом воздействия на машину и ее элементы внешних факторов (температуры, окружающей среды, механических нагрузок и радиации).

Основной причиной морального старения является появление на рынке более совершенных машин, характеризующихся повышенными технико-экономическими и другими показателями. Следует отметить, что моральное старение не вызывает отказов машин в отличие от физического старения.

Именно физическое старение, обусловленное воздействием на машины упомянутых факторов, является причиной отказов. Вследствие физического старения наблюдается ухудшение функциональных и других характеристик машины и ее агрегатов (безопасности, экономичности, точности, быстродействия). Критерием физического старения является, как правило, показатель технического состояния, поддающийся контролю, например, состав выбрасываемых в атмосферу вредных веществ, расход топлива в единицу времени, уровень шума и вибрации и др.

Физическое старение сдерживается системой технического обслуживания и ремонта. Время, затрачиваемое на восстановление машины в условиях эксплуатации, принято называть *простоями*.

Как отмечалось, переход машины (или ее элементов) из работоспособного в неработоспособное состояние происходит после наступления отказа – события, которое заключается в нарушении работоспособности машины. Иными словами, *отказ* – это состояние машины, при котором она частично или полностью теряет свою работоспособность и не может выполнять заданные функции, регламентированные нормативно-технической документацией (стандартами, техническими условиями и др.). В основе нарушений работоспособности машины лежат процессы изнашивания и изменения свойств материалов деталей, конструкций и сборочных единиц машины.

Отказы целесообразно классифицировать по следующим основным признакам:

- 1) по критерию – функциональные и параметрические отказы;
- 2) по причине возникновения – конструкционные, технологические и эксплуатационные;
- 3) по условиям возникновения и развития – внезапные и постепенные;
- 4) по сложности устранения – отказы, устраняемые при техническом обслуживании, в ходе текущего ремонта и при капитальном ремонте.

Функциональные отказы приводят к частичному или полному прекращению выполнения функций машины в целом или ее элементов. Очень часто отказы функционирования связаны с разрушениями элементов машины (поломками, недопустимыми деформациями, увеличенным износом и др.).

Параметрические отказы характеризуются отклонением параметров функционирования элементов машин за пределы допускаемых норм. К ним можно отнести увеличенный расход топливно-смазочных материалов, состав выбрасываемых в атмосферу вредных веществ, повышенный уровень шума и вибрации. Подобные отказы не препятствуют функционированию машины, однако с учетом требований нормативно-технической документации машина считается неработоспособной.

Конструкционные отказы возникают из-за упущений на этапе проектирования и конструирования. К ним относятся неудачная конструкция сборочной единицы или узла машины, ошибочно выбранный материал, неверно подобранная посадка в подвижных и неподвижных соединениях, несоответствие расчетных данных по прочности и износостойкости узлов машины нагрузочным режимам ее эксплуатации.

Технологические отказы происходят из-за недостатков на этапе изготовления машины в связи с нарушением требований технологии и контроля состояния ее элементов. К ним относятся дефекты в материале деталей, нарушение расположения поверхностей и осей при механической обработке деталей, несоблюдение режимов термической и химико-термической обработки, отступление от условий сборки-разборки агрегатов и машины в целом.

Эксплуатационные отказы в основном являются следствием естественного изнашивания при трении сопряженных деталей. Они также могут быть связаны с нарушениями режимов работы или правил эксплуатации машины, например, при ее использовании не по назначению, с увеличенными нагрузками, превышающими установленные пределы, низким уровнем технического обслуживания, ошибочным выбором топливно-смазочных материалов. Кроме того, в результате внешних воздействий, а также при грубых нарушениях правил эксплуатации могут возникнуть *аварийные отказы*.

Конструкционные и технологические отказы выявляются в основном в приработочный период. Количество эксплуатационных отказов резко возрастает на заключительной стадии эксплуатации машины из-за увеличения износа деталей в узлах трения машины.

Наиболее опасными для машины являются *внезапные отказы*, которые характеризуются резким ухудшением одного или нескольких параметров машины. Как правило, они возникают из-за конструктивной недоработки узла или агрегата; нарушений технологии производства и ремонта; случайного воздействия внешних факторов, превышающих допускаемые нормы; грубых нарушений условий эксплуатации (поломок, ударов, перегрузок, столкновений). Вследствие этого элементы машины теряют свои свойства, необходи-

мые для нормального функционирования машины, или же разрушаются. Количество таких отказов не превышает 10 % от общего числа отказов.

Постепенные отказы характеризуются постепенным ухудшением одного или нескольких параметров машины, обусловленным в основном процессами старения деталей и узлов машины. Как правило, развитие постепенных отказов можно предупредить с помощью системы технического обслуживания и ремонта машины. Они составляют подавляющее большинство отказов (до 90 % от общего числа).

В средней по сложности машине (производимой ранее в СССР) отказ появлялся через 15–20 дней эксплуатации, для устранения которого требовалось в среднем 50–70 чел·ч труда квалифицированных специалистов [20].

Отказы приводят к частичной или полной потере работоспособности машины. Анализ причин их возникновения и понимание физической сущности отказов являются непременным условием обеспечения надежности и работоспособности машины.

2.3 Усталостное разрушение деталей и конструкций

Самым значительным фактором, влияющим на отказы деталей и узлов машины, являются силовые нагрузки, которые вызывают необратимые изменения структуры и физико-механических характеристик материалов, из которых изготовлены детали машин.

Большое число отказов в машинах связано с механическим разрушением деталей и конструкций. Как правило, имеют место два типа *отказов* по критерию прочности:

– *внезапные*, вызванные мгновенным разрушением детали (действующие в детали или элементе конструкции напряжения превышают допустимые напряжения, обусловленные пределом прочности или текучести материала детали);

– *постепенные*, связанные с накоплением повреждений при многократно повторяющихся нагрузках, значения которых значительно ниже предела прочности или текучести материала.

Разрушения, вызванные внезапными статическими нагрузками (обычно это аварийные ситуации, например, наезд машины на непреодолимое препятствие и др.), встречаются редко.

В основном разрушение деталей и конструкций машин (строительных, дорожных, подъемно-транспортных и других) происходит по механизму постепенного накопления повреждений при переменных внешних нагрузках, изменяющихся по величине и частоте воздействий. Внешние нагрузки вызывают в детали напряжения (нормальные и касательные), которые развиваются в целом одинаково.

Переменные нагрузки при установившихся режимах нагружения могут вызывать в деталях и конструкциях циклические изменения нормальных напряжений различного характера.

Циклом называют нагружение детали с одним максимумом и одним минимумом в течение одного периода T . Цикл характеризуют следующими показателями:

– наибольшим σ_{\max} и наименьшим σ_{\min} напряжениями;

– средним напряжением $y_m = \frac{y_{\max} + y_{\min}}{2}$;

– амплитудой цикла $y_a = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2}$;

– коэффициентом асимметрии цикла $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$.

Различают отнулевой, симметричный, асимметричный и сложный циклы напряжений. На рисунке 2.3 представлены основные циклы напряжений, которые развиваются при различных видах нагружения деталей.

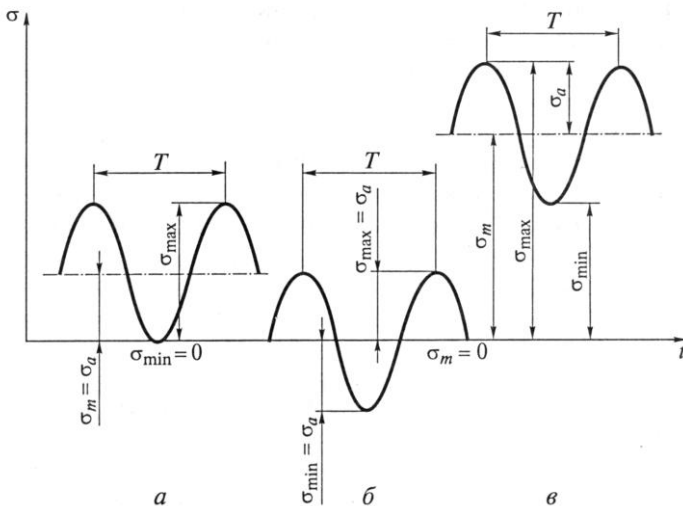


Рисунок 2.3 – Основные циклы напряжений:
 а – отнулевой; б – симметричный; в – асимметричный

У отнулевого ($R = 0$) цикла (см. рисунок 2.3, а) напряжения меняются от нуля до наибольшего σ_{\max} . У симметричного (см. рисунок 2.3, б) наибольшее σ_{\max} и наименьшее σ_{\min} напряжения противоположны по знаку и одинаковы по величине. Асимметричный цикл (см. рисунок 2.3, в) имеет неодинаковые по величине напряжения σ_{\max} и σ_{\min} , которые могут быть и знакопеременными, и знакопостоянными. И, наконец, сложный цикл сочетает особенности перечисленных циклов. Наиболее неблагоприятны

ми для работы детали являются циклы, имеющие знакопеременные напряжения.

В результате малозаметного, но весьма ощутимого воздействия на материалы циклических нагрузок со временем в деталях происходят необратимые явления, вызванные накоплением повреждений. Процесс накопления повреждений под воздействием переменных напряжений (нагрузок) называют *усталостью*. Если эти напряжения периодически превышают допускаемые, называемые *пределом выносливости*, в материале постепенно накапливаются микротрещины, которые, развиваясь, вызывают появление трещин недопустимых размеров или полное разрушение детали либо конструкции. Предел выносливости – это максимальное напряжение, которое может выдержать материал детали без разрушения при длительной эксплуатации.

Способность материала выдерживать переменные нагрузки называют *усталостной прочностью*. Она существенно ниже статической прочности материалов.

Количественно усталостный процесс описывают зависимостью (рисунок 2.4), связывающей максимальное напряжение σ в материале детали при ее нагружении с числом циклов нагружения N (кривая Велера). В качестве характеристики усталостной прочности материала детали принимают предел выносливости σ_0 .

Для большинства конструкционных материалов (в том числе сталей) кривая усталости в полулогарифмических координатах имеет вид прямой с изломом, как на рисунке 2.4. Число N_0 (точка перелома кривой) называют базовым числом циклов ($N_0 = 10^7$). Если величина действующего напряжения σ_i не превышает предела выносливости σ_0 , то она не оказывает разрушающего воздействия на деталь и не вызывает ее отказа.

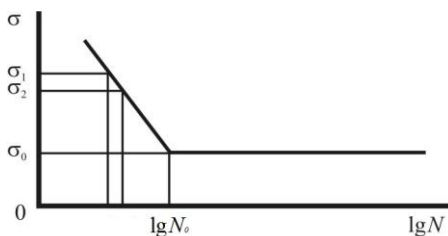


Рисунок 2.4 – Зависимость напряжений в материале детали от числа циклов нагружения

Практический интерес представляет наклонная (левая) часть кривой усталости, которая аппроксимируется степенной зависимостью

$$\frac{N_i}{N_0} = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right)^m. \quad (2.9)$$

Эта зависимость позволяет определить разрушающее число циклов N_i (т. е. ограниченную долговечность) при напряжениях в детали σ_i , если они превышают предел выносливости детали.

Показатель степени m зависит от свойств материала, формы и размера детали, условий нагружения и других факторов. Соответственно из-за этого его величина меняется в довольно широких пределах ($m = 3 \dots 20$). Его можно определить двумя способами. Во-первых, исходя их характеристик кривой усталости по формуле

$$m = \frac{\lg(N_0 / N_i)}{\lg(\sigma_0 / \sigma_i)}. \quad (2.10)$$

Во-вторых, по эмпирической зависимости

$$m = C / k, \quad (2.11)$$

где $C = 5 + \sigma_b / 80$;

k – коэффициент снижения предела выносливости, при растяжении-сжатии $k = 1$;

σ_b – предел выносливости при растяжении, МПа.

На рисунке 2.4 видно, что при увеличении напряжений с σ_2 до σ_1 ресурс детали уменьшается с N_2 до N_1 циклов. Число циклов, которое выдерживает деталь без разрушения (в данном случае N_1 и N_2) при определенном напряжении (соответственно при σ_1 и σ_2), называют **усталостной долговечностью**.

Приведенная кривая усталости характерна для многоцикловых усталостных разрушений, область которых охватывает диапазон от 10^5 до 10^7 и более циклов. Кроме того, имеется и малоцикловая усталость, которая возникает при 10^2 – 10^5 циклах нагружения. Возникновение малоцикловых разрушений происходит из-за того, что в локальных зонах детали вследствие наличия концентраторов напряжения появляются напряжения, близкие к пределу текучести материала.

Предел выносливости является не только характеристикой прочностных свойств материала, но и параметром, который отражает влияние конструкции детали, технологии изготовления и условий эксплуатации.

К основным **факторам, определяющим выносливость детали или конструкции**, относятся:

- конструктивные (наличие и количество концентраторов напряжений, масштабный фактор, форма поперечного сечения детали и др.);
- технологические (структура металла, наличие объемных и поверхностных дефектов, шероховатость поверхности, поверхностное упрочнение);

– эксплуатационные (режим и вид нагружения, характер нагрузки, среда и температура эксплуатации).

К конструктивным концентраторам напряжений деталей относятся острые углы и резкие переходы, резкое изменение формы детали, которые значительно снижают показатели выносливости, поскольку в этих зонах возникают большие напряжения. Наиболее опасными местами деталей являются впадины зубьев и резьб, галтели, шпоночные пазы и шлицы, поверхности с острыми углами. Для устранения их влияния на предел выносливости изменяют форму детали за счет оптимизации конфигурации опасных сечений, по возможности убирают острые углы и подрезы в деталях и конструкциях (например, за счет скругления впадин зубьев в зубчатых колесах), устраняют резкие переходы или изменяют конфигурацию переходных зон в деталях, сближают размеры различных зон деталей, а также увеличивают радиусы закруглений.

Конструктивные концентраторы напряжений *в соединениях* (сварных, заклепочных, резьбовых и прессовых) также отрицательно влияют на их выносливость. Например, в сварных соединениях концентрация напряжений возникает в швах из-за сварных дефектов (пор, непроваров, шлаковых включений) и неоднородности металла (литейной структуры шва, выгорания углерода и легирующих элементов). При этом предел выносливости сварных соединений снижается в 2–5 раз по сравнению с гладкими образцами из основного металла.

Масштабный фактор, а именно размеры заготовки, также влияет на выносливость детали. Чем больше абсолютные размеры поперечного сечения детали, тем больше дефектов структуры в объеме заготовки и тем меньше предел выносливости. При этом масштабный фактор не оказывает влияния на угол наклона кривых усталости и положение их точки излома. Поэтому для определения предела выносливости крупногабаритных деталей используют результаты испытаний небольших модельных образцов из тех же материалов, повторяющих форму деталей.

Структурная неоднородность металла (в том числе наличие примесей, неметаллических включений, пор и других объемных дефектов) может инициировать возникновение усталостных трещин и значительно (на порядок) снизить долговечность детали.

Качество поверхности, а именно *шероховатость*, поверхностные дефекты (царапины, задиры, риски и др.), снижают выносливость детали на 30–40 %.

Влияние режимов нагружения и характера нагрузок при эксплуатации машины на усталостную прочность ее деталей и конструкций зависит от свойств материала, особенностей конструкций деталей и других факторов.

Наиболее значимыми эксплуатационными факторами являются частота нагружений и асимметрия цикла нагружений, но их влияние на усталостную прочность неодинаково. Установлено, что в наиболее распространенном интервале частот (от 10 до 100 Гц) усталостная прочность незначительно зависит от частотных характеристик нагружения детали. При этом угол наклона кривой усталости при изменении частоты нагружений не меняется, что свидетельствует об отсутствии влияния этого фактора на скорость накопления повреждений.

Асимметрия цикла (характеризуется коэффициентом асимметрии R) снижает предел выносливости деталей и конструкций. Еще большее влияние на усталостную прочность оказывает наложение на основную частоту редких перегрузочных импульсов. Импульсные перегрузки на фоне основного нагружения, описываемого синусоидой, снижают усталостную прочность деталей и конструкций в 2–3 раза.

Выносливость деталей и конструкций существенно зависит от *среды, температурных режимов* эксплуатации и других факторов. Если циклическим напряжениям сопутствуют коррозионные процессы, воздействие высоких температур или радиации, предел выносливости может значительно снижаться, а в ряде случаев и вовсе отсутствовать (на кривой усталости).

На рисунке 2.5 представлены кривые усталости стальных образцов, которые были испытаны при циклических знакопеременных нагрузках на воздухе (кривая 1), в минеральном масле (кривая 2) и воде (кривая 3). Видно, что жидкая среда оказывает отрицательное влияние на предел выносливости и базовое число циклов.

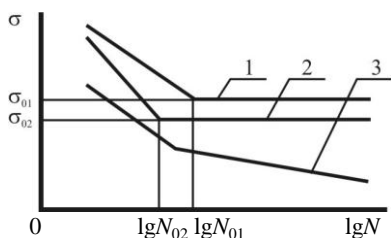


Рисунок 2.5 – Кривые усталости стальных (20X) деталей, полученные при испытаниях в различных средах: 1 – на воздухе; 2 – в минеральном масле; 3 – в воде

При испытаниях в минеральном масле (химически инертной среде) происходит снижение предела выносливости ($\sigma_{02} \leq \sigma_{01}$) и уменьшение базового числа циклов ($N_{02} \leq N_{01}$). Снижение выносливости обусловлено следующими обстоятельствами: во-первых, проникновением молекул масла в поры и микротрещины на поверхности образца; во-вторых, их адсорбцией; в-третьих, расклинивающим действием молекул масла на стенки поверхностных микротрещин

при циклических нагрузках на образец; и, наконец, в-четвертых, ускорением процесса развития поверхностных микротрещин. Это явление получило название адсорбционно-расклинивающего эффекта (эффекта Ребиндера).

При испытаниях в воде (химически активной среде) кривая усталости и вовсе вырождается из-за превалирующего влияния коррозионного разрушения металла.

Следует отметить, что расчеты на выносливость обеспечивают высокую точность только при стационарном циклическом нагружении, когда параметры всех циклов одинаковы. При нестационарном режиме нагружения используются расчеты на усталость, основанные на гипотезе суммирования усталостных повреждений, возникающих под действием различных нагрузок. Учет их влияния производится на основе различных гипотез. Наиболее распространенной является гипотеза линейного суммирования напряжений (гипотеза Пальмгрейна–Майнера). Согласно этой гипотезе разрушение детали происходит в результате постепенного накопления в материале повреждений. Если деталь работает в переменном (ступенчатом) режиме нагружений, то на каждой i -й ступени степень повреждения детали можно приближенно оценить ее относительной долговечностью, т. е. отношением числа циклов нагружения на этой ступени n_i при напряжении σ_i к числу циклов нагружения N_{pi} до разрушения (n_i/N_{pi}). При этом число повреждений будет нарастать пропорционально относительной долговечности детали на каждой ступени и может линейно суммироваться, т. е. $n_1 / N_{p1} + n_2 / N_{p2} + \dots + n_k / N_{pk} = \sum_{i=1}^k n_i / N_{pi}$.

Условие разрушения при ступенчатом изменении нагрузок можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^k (n_i / N_{pi}) = \omega, \quad (2.12)$$

где k – число уровней нагружения до разрушения;

n_i – число циклов нагружения за время эксплуатации при напряжении σ_i ;

N_{pi} – число циклов нагружения до разрушения при напряжении σ_i ;

ω – параметр, учитывающий особенности материала детали и условия нагружения.

В самом простом случае при $\omega = 1$ согласно этой гипотезе, если деталь, например, при напряжении σ_1 (см. рисунок 2.4) выработала 30 % своего ресурса ($n_1 = 0,3N_1$), то при напряжении σ_2 она может выработать 70 % ресурса ($n_2 = 0,7N_2$), т. е.

$$\sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i} = \frac{0,3N_1}{N_1} + \frac{0,7N_2}{N_2} = 1. \quad (2.13)$$

Из-за своей простоты гипотеза линейного суммирования повреждений более распространена, чем гипотезы нелинейного суммирования.

Многочисленные проверки показали, что она дает вполне достаточную для инженерных расчетов точность результатов при различных видах нагружений.

Описанный нестационарный режим можно привести (с рядом допущений) к некоторому эквивалентному стационарному режиму работы, при котором деталь приобретает такую же степень повреждений, что и при нестационарном процессе. Если в качестве эквивалентного принять режим с напряжением $\sigma_{\text{экр}} = \sigma_{-1}$ и долговечность N_0 , то из уравнения кривой усталости получим $\sigma_i^m N_{pi} = \sigma_{-1}^m N_0$. Отсюда

$$N_{pi} = \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_i} \right)^m N_0. \quad (2.14)$$

Если подставить данное равенство в условие разрушения, то получим выражение

$$\sigma_{\text{экр}} = \sqrt[m]{\frac{1}{\omega N_0} \sum_{i=1}^k \sigma_i^m N_i}. \quad (2.15)$$

Полученное соотношение можно использовать и для определения эквивалентной нагрузки, если заданы нагрузки на отдельных ступенях нестационарного режима.

Как уже отмечалось, обычно принимают $\omega = 1$, т. е. считают, что *деталь разрушается, если сумма накопленных повреждений в ней достигает единицы.*

Для углубленного анализа явлений, происходящих в процессах усталостного разрушения стальных деталей, используют обобщенную диаграмму усталости, представленную на рисунке 2.6, которая включает и упомянутую ранее кривую усталости Велера. Усталостное разрушение протекает в три этапа.

На первом этапе (I) в результате действия циклических напряжений, которые не превышают предела упругости материала, происходит накопление упругих искажений в его кристаллической решетке. Линия $A'B'C'D'$ характеризует условия проявления и накопления искажений кристаллической решетки.

На втором (II) эти искажения становятся критическими, что сопровождается развитием субмикроскопических усталостных трещин. Линия $A'C$ (линия Френча) характеризует переход субмикроскопических трещин в микротрещины.

И, наконец, на третьем этапе (III) субмикроскопические трещины, накапливаясь, достигают размеров микротрещин, что является причиной разрушения детали. Об этом свидетельствует описанная ранее (см.

рисунок 2.4) кривая выносливости ABC (кривая Велера), которая определяет зависимость между напряжениями в детали и числом циклов ее эксплуатации до разрушения.

При оценке надежности и работоспособности деталей узлов и агрегатов дорожно-строительных, путевых, подъемно-транспортных и других машин наибольший интерес представляют детали и элементы трансмиссий (зубчатые колеса, валы, подшипники и др.). Их работоспособность характеризуется рядом критериев: прочностью, износостойкостью, устойчивостью, жесткостью, теплостойкостью и др.

Расчет надежности базируется на сопоставлении расчетного значения заданного критерия с его предельным значением, которое выбирают по нормативным и справочным материалам или устанавливают опытным путем (по результатам специальных испытаний или наблюдений при эксплуатации).

Работоспособность деталей, конструкций или узлов по заданному критерию считают обеспеченной, если расчетное значение критерия Y меньше его предельного значения $Y_{пред}$. Это условие выполняют, используя коэффициент безопасности n , связывающий упомянутые значения параметров ($n = Y_{пред} / Y$); соответственно расчетное условие можно выразить неравенством

$$Y \leq Y_{пред} / n. \quad (2.16)$$

В вероятностных расчетах значения Y и $Y_{пред}$ рассматривают как случайные и независимые величины, распределенные по нормальному закону. В свою очередь их разность также считают случайной величиной, распределенной по тому же закону. Показателем надежности является вероятность безотказной работы P по заданному критерию. Для обеспечения вероятности P должно быть выполнено условие

$$\bar{Y} - \bar{Y}_{пред} = u_p S. \quad (2.17)$$

где \bar{Y} , $\bar{Y}_{пред}$ – средние значения величин Y и $Y_{пред}$;

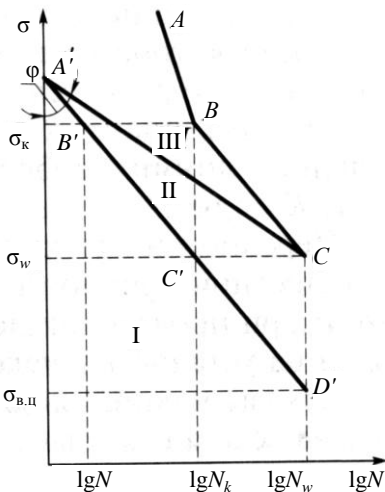


Рисунок 2.6 – Обобщенная диаграмма усталости

$S = \sqrt{S_Y^2 + S_{Y_{\text{пред}}}^2}$ – среднее квадратическое отклонение разности двух случайных величин Y и $Y_{\text{пред}}$;

S_Y и $S_{Y_{\text{пред}}}$ – средние квадратические отклонения величин Y и $Y_{\text{пред}}$;

u_p – квантиль нормированного нормального распределения.

Вероятность безотказной работы P по заданному критерию определяют (по таблицам) в зависимости от величины квантили:

$$u_p = -\frac{\bar{Y}_{\text{пред}} - \bar{Y}}{\sqrt{S_{Y_{\text{пред}}}^2 + S_Y^2}}. \quad (2.18)$$

Связь между квантилью u_p и коэффициентом безопасности, рассчитанным по средним значениям ($\bar{n} = \bar{Y}_{\text{пред}} / \bar{Y}$), имеет вид

$$u_p = -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{(\bar{n})v_{Y_{\text{пред}}}^2 + v_Y^2}}. \quad (2.19)$$

где $v_{Y_{\text{пред}}}$ и v_Y – коэффициенты вариации,

$$v_{Y_{\text{пред}}} = S_{Y_{\text{пред}}} / \bar{Y}_{\text{пред}}; \quad v_Y = S_Y / \bar{Y}.$$

Таким образом, зная квантиль или вероятность безотказной работы P , можно оценить коэффициент безопасности \bar{n} .

В общем случае параметр Y может зависеть от различных факторов и может быть выражен функциональной зависимостью

$$Y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где x_i – случайный фактор.

В свою очередь среднее значение \bar{Y} выражают зависимостью

$$\bar{Y} = \varphi(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n).$$

Среднее квадратическое отклонение параметра Y определяют из выражения

$$S_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)^2 S_i^2},$$

где $\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}$ – частная производная функции φ по фактору x_i , в которую

подставляют среднее значение фактора \bar{x}_i ;

S_i – среднее квадратическое отклонение i -го фактора.

На практике широко используются следующие методы оценки способности деталей и конструкций выдерживать нагрузки, основанные на расчетах:

- 1) по допускаемым напряжениям;
- 2) запасам прочности;
- 3) прочностной надежности по вероятности разрушения или вероятности безотказной работы.

Расчеты на прочность по допускаемым напряжениям и запасам прочности позволяют на стадии проектирования дать приближенную оценку прочности деталей и конструкций, но они не учитывают случайного характера влияния нагружения.

Вероятностные расчеты прочности позволяют учесть фактор случайности и перейти от оценки прочности по коэффициентам прочности к оценке вероятности безотказной работы и прогнозированию ресурса деталей и конструкций.

Поскольку использование вероятностных расчетов усложняет этап конструирования и проектирования машин, предварительно необходимо определить номенклатуру деталей и конструкций, для которых подобные расчеты целесообразны. При этом нужно учитывать следующие соображения.

Во-первых, одним из факторов, определяющих необходимость использования вероятностных методов расчета прочности, является ограничение проектируемой детали или конструкции по размерам, т. е. отсутствие возможности обеспечения больших запасов прочности. Например, в механических трансмиссиях машин к ним можно отнести зубчатые передачи и подшипники качения. В таких случаях, когда необходимо обеспечить малые запасы прочности, целесообразно производить вероятностные расчеты.

Во-вторых, необходимо учитывать характер нагружения деталей и конструкций машины. При действии случайных нагрузок методы оценки их прочности по коэффициентам запаса прочности дают большую погрешность.

И, наконец, в-третьих, следует учитывать возможность изменения прочностных характеристик материалов при нагружении деталей и конструкций. Случайный характер их изменения также является основанием для вероятностных расчетов.

Таким образом, каждый из перечисленных факторов (необходимость обеспечения малых запасов прочности, случайные характеры нагружения и изменения физико-механических характеристик материалов) обуславливает целесообразность проведения вероятностных расчетов.

В расчетах вероятности безотказной работы по критерию прочности обычно рассматривают три вида ресурсных отказов деталей и конструкций, происходящих из-за разрушений:

- 1) статических, возникающих в результате кратковременного (от одного

до нескольких десятков циклов нагружения) приложения больших сил;

2) малоцикловых, которые являются основными для конструкций, работающих в течение 10^2 – 10^5 циклов нагружения;

3) усталостных (многоцикловых), возникающих в деталях при большом числе циклов нагружения (более 10^5).

В качестве расчетных параметров Y при оценке надежности по критерию прочности выбирают расчетные напряжения или нагрузку. Предельными параметрами $Y_{\text{пред}}$ считают пределы прочности, текучести, выносливости или несущую способность.

При расчетах прочности деталей и конструкций машин полагают, что распределения нагрузок F и прочности σ подчиняются нормальному закону распределения с плотностями вероятностей $f(F)$ и $f(\sigma)$ соответственно. Количественно эти параметры задают их числовыми характеристиками – средними значениями (математическими ожиданиями) \bar{F} и $\bar{\sigma}$, средними квадратическими отклонениями S_F и S_σ или коэффициентами вариации ν_F и ν_σ . Если плотности распределения $f(F)$ и $f(\sigma)$ имеют участок взаимного пересечения (рисунок 2.7), то вероятность отказа будет определяться площадью этого участка. Как видно из рисунка 2.6, с увеличением рассеяния нагрузок и механических свойств материала она будет возрастать.

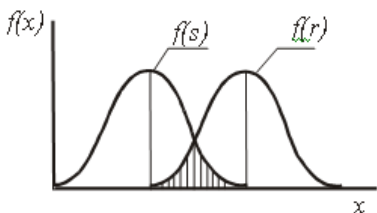


Рисунок 2.7 – Распределение плотностей вероятности нагрузки и прочности при расчете на статическую прочность

Функцию надежности можно определить из выражения

$$P = \Phi \left(- \frac{\bar{F} - \bar{\sigma}}{\sqrt{S_F^2 + S_\sigma^2}} \right),$$

где $\Phi(u)$ – нормированная нормальная функция распределения, которая, как уже отмечалось, табулирована, и ее значения можно определить по соответствующим таблицам нормального распределения.

В расчетах деталей машин прочность оценивают по соотношению расчетного σ_p и предельного $\sigma_{\text{пред}}$ (по критерию прочности) напряжений, превышение которого вызывает отказ детали. Вероятность безотказной работы определяют как вероятность того, что расчетные напряжения не превышают предельных. Числовое значение этой вероятности определяют по таблицам нормального распределения в зависимости от квантили, если известны

средние значения параметров $\bar{\sigma}_p$ и $\bar{\sigma}_{\text{пред}}$, средние квадратические отклонения S_{σ_p} и $S_{\sigma_{\text{пред}}}$ или коэффициенты вариации $v_{\sigma_p} = S_{\sigma_p} / \bar{\sigma}_p$ и $v_{\sigma_{\text{пред}}} = S_{\sigma_{\text{пред}}} / \bar{\sigma}_{\text{пред}}$. В этом случае квантиль можно получить из выражения

$$u_p = - \frac{\bar{\sigma}_{\text{пред}} - \bar{\sigma}_p}{\sqrt{S_{\sigma_{\text{пред}}}^2 + S_{\sigma_p}^2}}. \quad (2.20)$$

Его также можно выразить через запас прочности $\bar{n} = \bar{\sigma}_{\text{пред}} / \bar{\sigma}_p$:

$$u_p = - \frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{(\bar{n} v_{\sigma_{\text{пред}}})^2 + v_{\sigma_p}^2}}. \quad (2.21)$$

2.4 Изнашивание деталей в узлах трения

Изнашиванием (износом) называют процесс постепенного изменения геометрических размеров и форм элементов машины (рабочих органов, ходового оборудования, деталей в сопряжениях) при трении, которое проявляется в отделении с поверхности трения частиц материала и в его остаточной деформации. В современных машинах отказы из-за износа достигают 80–90 % от общего числа отказов. Отказы в узлах трения могут возникать по ряду причин: во-первых, из-за износа трущихся поверхностей до предельного состояния; во-вторых, из-за резкого увеличения коэффициента трения вплоть до схватывания и заедания поверхностей трения; в-третьих, из-за недопустимого уменьшения коэффициента трения в тормозных системах и фрикционных передачах. Из них основной причиной отказов является износ трущихся поверхностей.

Как правило, изнашивание характеризуют величиной *линейного износа* I , т. е. изменением размеров детали в направлении, перпендикулярном к поверхности трения. В ряде случаев для оценки изнашивания используют величину объемного или массового износа. К основным показателям износа относят скорость и интенсивность изнашивания.

Скорость изнашивания определяют как отношение величины износа ко времени, в течение которого он возникает:

$$v_i = \frac{I}{t}, \quad (2.22)$$

где I – величина линейного износа;

t – время изнашивания.

Интенсивность изнашивания определяют как отношение величины износа к длине пути трения, на котором происходит изнашивание:

$$J_l = \frac{l}{L}, \quad (2.23)$$

где L – длина пути трения.

Свойство материала при трении оказывать сопротивление изнашиванию называют **износостойкостью**. Для ее оценки используют показатели, обратные скорости или интенсивности изнашивания.

Одним из важных факторов трения и изнашивания является характер взаимных перемещений, во многом определяющий динамику изнашивания. Относительное перемещение сопряженных элементов в узле трения может быть с трением скольжения, трением качения и трением качения с проскальзыванием.

При *трении скольжения* происходит наибольший износ сопряженных деталей, что сопровождается высокой энергоемкостью процесса трения. Например, однозаходная червячная пара, в которой реализовано трение скольжения, имеет наименьший КПД ($\eta \leq 0,75$) из всех зубчатых передач. Оно характерно для кинематических пар, содержащих подшипники скольжения, манжетные уплотнители, направляющие и др. Кроме того, в машинах используют такой положительный эффект трения скольжения, как возможность реализации больших сил трения при относительно малых нормальных силах (в тормозных системах, фрикционных передачах и др.).

Трение качения имеет наибольшее распространение в машинах в связи с минимальным износом и низкой энергоемкостью. Этот вид трения реализуется в парах вал – подшипник качения, колесо – рельс, ролик – лента и др.

При *трении качения с проскальзыванием* относительное перемещение деталей осуществляется одновременно с качением и скольжением. Этот вид трения по износу и энергетическим характеристикам занимает промежуточное положение между трением скольжения и трением качения. Трение качения с проскальзыванием происходит в кулачковых механизмах, в зубчатых передачах, обеспечивая в последних значительно меньшие потери на трение по сравнению с червячными передачами.

Вид трения не является постоянной характеристикой узла трения. Даже для правильно сконструированного и изготовленного узла при эксплуатации вид трения может меняться, и его изменение сопровождается снижением и потерей работоспособности узла. Так, при загрязнении подшипников качения трение качения переходит в трение скольжения их промежуточных тел (роликов или шариков) по поверхности одного из колец или в трение скольжения подшипника по поверхности гнезда. При движении колес по рельсам трение качения колеса по рельсу переходит в трение качения с проскальзыванием в паре обод колеса – рабочая поверхность рельса и в трение скольжения в паре ребора колеса – боковая поверхность головки рельса.

Изнашивание происходит в местах фактического контакта трущихся по-

верхностей, размеры которых намного меньше номинальной площади контакта, определяемой размерами сопряженных деталей. Силы, действующие в местах фактического контакта, вызывают деформации в поверхностных слоях, которые при многократном повторении приводят к усталостному разрушению поверхностных слоев. Помимо этого, на микровыступах площадок контакта может происходить микрорезание (отделение частиц материала), которое существенно интенсифицируется, если в зону трения попадают абразивные частицы.

Описанные явления часто сопровождаются физическим и химическим взаимодействием материалов трущихся деталей. Все это свидетельствует о сложности процессов изнашивания, зависящего от многих факторов, в числе которых макро- и микрорельеф поверхности, нагрузки и скорости относительного перемещения деталей, свойства материалов и состояние трущихся поверхностей, наличие смазочного материала и загрязнений, форма детали и особенности конструкции узла трения.

Многочисленные и разнообразные виды изнашивания классифицированы, стандартизированы (ГОСТ 16429–70) и разделены на три основные группы: механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое. На практике наиболее часто встречается *механическое* изнашивание, которое, в свою очередь, разделяют на усталостное, абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, эрозионное и кавитационное. Следует отметить, что это разделение в известной мере условно, поскольку чаще всего встречаются комбинации различных видов изнашивания. Тем не менее при эксплуатации строительных, дорожных, подъемно-транспортных и других машин основными видами изнашивания их деталей и узлов являются абразивное и усталостное.

Абразивное изнашивание происходит в результате микрорезания или многократного деформирования металла частицами твердых материалов (гравия, щебня, песка, пыли). С увеличением нагрузки и размеров частиц величина износа возрастает, а с увеличением твердости металла снижается. Микрорезание наступает при соотношении твердости материала поверхностного слоя детали H_d и твердости частиц абразива H_a меньше 0,5, т.е. $H_d/H_a < 0,5$.

Преимущественно абразивному изнашиванию подвергаются поверхности элементов рабочего оборудования машин, которые взаимодействуют с перерабатываемым материалом или разрабатываемым грунтом, а также элементы ходового оборудования. К ним относятся режущие элементы рабочих органов строительных, дорожных и других машин (ножи, зубья и отвалы бульдозеров и грейдеров, зубья, ножи и режущие кромки ковшей экскаваторов и скреперов, долота, зубила и другое сменное рабочее оборудование одноковшовых экскаваторов, лопасти шнеков и фрез распределите-

лей дорожно-строительных материалов и асфальтоукладчиков), а также детали и элементы ходовых устройств (протекторы пневмошин, звенья и катки гусениц, обода колес на рельсах) и многое другое. Для примера величины износа можно привести изнашивание рабочих органов бульдозера. При линейном износе ножей отвала 14–15 мм удельное сопротивление резанию увеличивается в 1,5 раза при росте расхода мощности и снижении производительности машины. Однако даже при большом износе рабочих органов машина продолжает оставаться в работоспособном состоянии.

Усталостное изнашивание в основном возникает при трении деталей в подвижных сопряжениях (вал – подшипник, вал – втулка и др.). Оно обусловлено знакопеременным деформированием металла деталей в зоне трения, которое приводит к накоплению повреждений в виде приповерхностных пор и перерастанию их в трещины, а затем – к отслаиванию частиц металла или выкрашиванию на поверхности трения. Усталостное изнашивание характерно для узлов трения, защищенных от коррозии и попадания абразивных частиц, в частности, для элементов силовых передач и других сопряжений. При увеличении износа деталей в подвижных сопряжениях растут зазоры между ними, вызывая усиление динамических нагрузок, ухудшение условий смазывания в зоне трения и, в конечном счете, выход из строя узла трения.

При анализе трения и изнашивания в подвижных сопряжениях следует различать базовые (пассивные) и активные детали. Базовые детали сборочной единицы, к которым относятся корпуса различных редукторов и коробок передач, конструкционные и другие элементы машин, служат для удержания активных деталей в требуемом положении и воспринимают возникающие нагрузки. Их старение проявляется в изменении положения в пространстве опорных поверхностей, в короблении привалочных поверхностей и пр. Как правило, наработка базовой детали сборочной единицы до предельного состояния является планируемой межремонтной наработкой самой сборочной единицы.

Долговечность активных деталей, подвергающихся изнашиванию, значительно ниже, чем базовых, поскольку активные детали воспринимают и передают крутящие моменты, другие силовые нагрузки, циклические напряжения и пр. Рабочие поверхности этих деталей (валов и осей, зубчатых колес, поршней, цилиндров и др.) находятся во фрикционном взаимодействии с рабочими поверхностями других деталей, работая в условиях переменных механических нагрузок.

Для прогнозирования величины износа деталей в узлах трения машины важно знать характер зависимости износа от времени наработки, т. е. динамику процесса изнашивания. Все виды этих зависимостей можно описать несколькими моделями, представленными на рисунках 2.8 и 2.9.

Кривая 2 (см. рисунок 2.8) характеризует линейную зависимость величины износа от времени. Она удовлетворительно описывает абразивное изнашивание рабочих элементов машины, контактирующих с разрабатываемым грунтом (отвалов, ножей, зубьев, стенок ковшей и др.).

Кривая 4 имеет период приработки и период с постоянной скоростью изнашивания, что характерно для некоторых шарнирных соединений и подшипников скольжения.

Кривая 3 отличается монотонно убывающей скоростью изнашивания, что характерно для зубчатых колес и подшипников скольжения при абразивном изнашивании.

Кривая 1 характеризуется монотонно повышающейся скоростью изнашивания и описывает износ шарнирных соединений гусеничных цепей и других деталей подобного типа, где из-за увеличивающегося зазора в сопряжение попадают все большие частицы абразива.

Для моделей изнашивания, описанных кривыми 3 и 1, можно использовать соотношение, связывающее ресурс детали с характеристиками износа:

$$T = n \sqrt[n]{I_{\text{пред}} / v_l}, \quad (2.24)$$

где $I_{\text{пред}}$ – предельно допустимая величина износа.

Указанное соотношение справедливо для кривой 3 при $n < 1$ и для кривой 1 при $n > 1$.

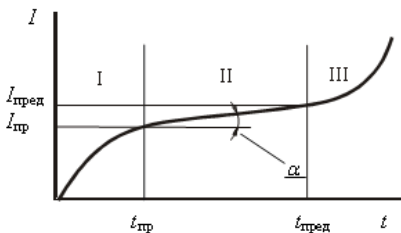


Рисунок 2.9 – Обобщенная зависимость износа от времени (кривая Лоренца)

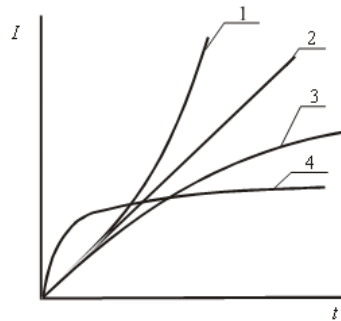


Рисунок 2.8 – Различные типы зависимости износа деталей от времени работы в узле трения

И, наконец, наиболее *общая модель изнашивания* (кривая Лоренца), представленная на рисунке 2.9, включает три основных периода:

1) *период приработки* ($0 - t_{\text{пр}}$), для которого характерен резкий рост износа (до величины $I_{\text{пр}}$) с образованием большого количества продуктов изнашивания, загрязняющих смазку, и с повышением температуры в зоне трения;

2) *период стабильной эксплуатации узла трения* ($t_{\text{пр}} - t_{\text{пред}}$) с установившейся скоростью изнашивания до предельно допустимой величины износа ($I_{\text{пред}}$);

3) *период критического (катастрофического) изнашивания* ($t > t_{\text{пред}}$), в результате которого растут зазоры в сопряжениях, вызывая дополнительные

динамические нагрузки и ухудшение условий смазывания трущихся поверхностей, а по достижении критической (предельной) величины износа возникают ударные нагрузки, резкое повышение температуры, заедание и, в конечном счете, выход из строя узла трения.

Таким образом, для периода нормальной эксплуатации узла трения характерна практически постоянная скорость изнашивания поверхности сопряженных деталей. С учетом этого можно определить *ресурс детали*:

$$T = \frac{I_{\text{пред}} - I_{\text{пр}}}{v_l}, \quad (2.25)$$

где $v_l = \text{tg}\alpha$;

α – угол наклона кривой.

Как правило, узлы трения работают с перерывами и в ступенчатом режиме, что отражается на кривых изнашивания деталей узла, которые, в свою очередь, будут иметь ступенчатый вид. В общем случае ресурс детали узла трения, работающего в ступенчатом режиме, можно найти из выражения

$$\sum_{i=1}^N t_i v_i = I_{\text{пред}},$$

где t_i – длительность i -го цикла (ступени);

N – число циклов работы за весь ресурс детали.

Если длительность цикла t_i выразить через ее относительную долговечность $f_i (t_i = T f_i)$, то ресурс детали будет иметь вид

$$T = \frac{I_{\text{пред}}}{\sum_{i=1}^N f_i v_i} = \frac{I_{\text{пред}}}{\bar{v}_i}, \quad (2.26)$$

где f_i – относительная долговечность i -го цикла;

\bar{v}_i – средняя скорость изнашивания детали.

Как видно из выражения (2.26), ресурс деталей узла трения связан с величинами предельного износа и средней скорости изнашивания.

В ряде случаев ресурс детали оценивают с помощью метода подобия, согласно которому определение срока службы рассчитываемой детали T_p базируется на известном сроке службы детали-аналога T_a . Если эти детали (рассчитываемая и аналог) эксплуатируются в одинаковых узлах машин одного типа, то срок службы рассчитываемой детали можно определить из выражения

$$\frac{T_p}{T_a} = \frac{K_p}{K_a}, \quad (2.27)$$

где K_p и K_a – обобщенные коэффициенты рассчитываемой детали и аналога,

$$K_p = K_{p1} K_{p2} K_{p3}; \quad K_a = K_{a1} K_{a2} K_{a3};$$

K_{pi} и K_{ai} – коэффициенты учета влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов рассчитываемой детали и аналога ($i = 1, 2, 3$).

В общем случае отказы в узлах трения по причине износа определяются состоянием контактирующих поверхностей, наличием смазочного материала, нагрузкой в узле трения, скоростью взаимных перемещений трущихся деталей, а также допустимыми величинами износа. Прогнозирование надежности узлов трения осложняется тем, что упомянутые факторы (за исключением допустимых величин износа) могут изменяться в процессе работы узла трения.

Изнашивание является сложным процессом, зависящим от физико-химических, конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Как отмечалось, наиболее характерным для дорожных, строительных и других машин является абразивное изнашивание, которое происходит в результате микрорезания или многократного деформирования материала детали под действием абразивных частиц. Этот вид изнашивания является преобладающим для элементов рабочего и ходового оборудования, а также узлов трения машин при попадании абразивных частиц в зону трения.

При оценке надежности по критерию износостойкости в инженерных расчетах ее наиболее информативной характеристикой является **линейный износ**: чем ниже износ, тем выше износостойкость детали. Оценку надежности можно вести по изменению (уменьшению) линейного размера одной детали при изнашивании, а также по изменению соотношения линейных размеров сопряженных деталей (увеличению зазора в подшипниках, шага зубчатых и цепных передач и др.). Текущую величину износа I можно оценить, используя выражение

$$I = J \nu t, \quad (2.28)$$

где J – интенсивность изнашивания;

ν – скорость относительного перемещения трущихся поверхностей;

t – время работы узла трения.

Предельно допустимая величина износа Δ связана с размерами детали (начальным значением $L_{нач}$ и предельно допустимым значением, при износе до которого наступает отказ, $L_{пред}$) простым соотношением

$$\Delta = L_{нач} - L_{пред}. \quad (2.29)$$

Если известны параметры $L_{нач}$ и $L_{пред}$, а также другие характеристики изнашивания, вероятность безотказной работы детали P можно определить по квантили нормального распределения

$$u_p = - \frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{(\bar{n} \nu_{\Delta})^2 + \nu_J^2}}, \quad (2.30)$$

где $v_{\Delta} = S_L / \bar{\Delta}$ – коэффициент вариации размера детали;

S_L – среднее квадратическое отклонение начального размера;

$\bar{\Delta} = \bar{L}_{\text{нач}} - L_{\text{пред}}$ – для предельно допустимого уменьшения размера;

$\bar{\Delta} = L_{\text{пред}} - \bar{L}_{\text{нач}}$ – для предельно допустимого увеличения размера (зазора);

$\bar{L}_{\text{нач}}$ – среднее значение начального размера;

$\bar{n} = \bar{\Delta} / (\bar{J} \cup t)$ – условный коэффициент запаса по износу (отношение средних значений предельно допустимого износа $\bar{\Delta}$ к действительному);

\bar{J} – среднее значение интенсивности изнашивания;

v_J – коэффициент вариации интенсивности изнашивания.

При оценке работоспособности узла трения важной задачей является правильный выбор предельно допустимых величин износа деталей узла, поскольку нормативы на эти величины имеются для ограниченной номенклатуры деталей. Она не имеет общих рекомендаций, поскольку предельное состояние определяют для конкретного типа сопряжений, узлов и машин с учетом последствий отказов. В общем случае следствием достижения предельного состояния изнашивающихся деталей и их сопряжений могут быть функциональные нарушения, увеличение энергетических потерь и снижение КПД, уменьшение прочности и жесткости деталей, возникновение ошибок положений деталей в результате изнашивания сопряженных деталей узла трения.

Важность поиска оптимальной величины предельного износа обусловлена, с одной стороны, неоправданным уменьшением срока службы деталей при ее занижении, а с другой – повышением текущих затрат из-за аварийных ремонтов при ее завышении. В настоящее время имеется несколько критериев оценки величины предельного износа в зависимости от вида узла трения и типа сопряжения: по потере прочности детали, снижению производительности и увеличению энергоемкости, нарушению нормального взаимодействия деталей (в зубчатых передачах, в шарнирных соединениях) или по невыполнению заданных функций.

Предельный износ элементов может быть установлен из условия обеспечения их нормальной работы или других ограничений. В качестве примера таких ограничений для рабочих органов можно привести уменьшение зубьев ковша наполовину их длины, уменьшение длины ножей отвала бульдозера на величину, определяемую началом изнашивания рамы, и др. Кроме того, установление величин предельного износа имеет существенное значение при выборе такого конструктивного параметра деталей узлов трения и элементов рабочего оборудования, как толщина упрочненного (тем или иным методом) слоя на поверхности детали с учетом запаса на износ.

Не менее важное значение имеет оценка скоростей изнашивания деталей узлов трения и элементов рабочего оборудования. В настоящее время име-

ется большой экспериментальный материал о динамике изнашивания с описанием процесса различными эмпирическими уравнениями. Среднюю скорость изнашивания определяют разными методами, отличающимися подходом к оценке основных параметров трения и их связи со скоростью изнашивания. Один из них связывает скорость изнашивания с мощностью процесса трения и площадью фрикционного контакта. В этом случае среднюю скорость изнашивания элементов рабочего оборудования в абразивной среде можно определить по формуле

$$\bar{v} = a k_{\text{абр}} \bar{N}_{\text{тр}} / (F \epsilon_{\text{и}}), \quad (2.31)$$

где a – коэффициент износа (коэффициент пропорциональности);

$k_{\text{абр}}$ – коэффициент абразивности среды ($k_{\text{абр}} = 1 \dots 6$);

$\bar{N}_{\text{тр}}$ – средняя мощность трения;

F – площадь трения (площадь контакта трущихся элементов);

$\epsilon_{\text{и}}$ – относительная износостойкость трущегося элемента ($\epsilon_{\text{и}} = 1, 0 \dots 2, 2$).

Среднюю мощность трения находят из выражения

$$\bar{N}_{\text{тр}} = f P v, \quad (2.32)$$

где f – коэффициент трения между рабочим органом и средой;

P – нормальная сила, действующая в зоне трения;

v – скорость относительного движения.

Формулу для определения средней скорости изнашивания элементов рабочего оборудования в абразивной среде можно также использовать для оценки скорости изнашивания трущихся поверхностей в узле трения в случае контактно-абразивного изнашивания. Оно возникает в сопряжениях при наличии в смазочном материале большого количества абразива (более 3 мас. %). При этом относительная износостойкость $\epsilon_{\text{и}}$ детали в основном определяется твердостью материала H , из которого она изготовлена, т.е. $\epsilon_{\text{и}} = H/H_{\text{эт}}$, где $H_{\text{эт}}$ – твердость материала эталонной детали.

2.5 Коррозионное разрушение деталей и конструкций

Коррозией называют постепенное поверхностное разрушение металлов и сплавов в результате химического или электрохимического воздействия окружающей среды. Результатом воздействия является в основном окисление металлов и сплавов.

Коррозию классифицируют по следующим признакам:

1) по механизму взаимодействия материала со средой – химическая и электрохимическая;

2) по типу коррозионной среды – газовая, атмосферная, жидкостная и подземная;

3) по условиям протекания коррозионного процесса – структурная, контактная, щелевая, под механическим напряжением и фреттинг-коррозия;

4) по виду коррозионного разрушения поверхности металла – сплошная и местная.

В свою очередь, каждый из приведенных признаков можно разделить на несколько подгрупп, что свидетельствует о многообразии и сложности коррозионных процессов.

Основной ущерб рабочим органам, металлоконструкциям и деталям строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин наносит *атмосферная коррозия*. В зависимости от степени увлажнения поверхности металла ее разделяют на *сухую, влажную и мокрую*.

Сухая атмосферная коррозия протекает на поверхности металла при наличии слоев влаги толщиной до 1 мкм (10^3 нм) и обусловлена окислением металла. В результате химического взаимодействия возникают слои окисленного металла (оксиды), толщина которых зависит от природы металла и достигает 2–4 нм. Ее влияние на работоспособность деталей и конструкций машин незначительно.

Влажная атмосферная коррозия протекает на поверхности металла при наличии высокой относительной влажности воздуха (до 98 %), которая формирует слои влаги на металле толщиной до 1 мкм и имеет электрохимический характер. Интенсивность и скорость коррозионного разрушения поверхности металла резко возрастают с увеличением толщины пленки влаги.

Мокрая коррозия протекает в условиях капельной конденсации влаги на поверхности металла или прямого попадания осадков на поверхность металла с образованием пленок влаги толщиной более 1 мкм. Механизм разрушения при мокрой коррозии имеет электрохимический характер.

Взаимосвязь различных видов атмосферной коррозии можно проследить по рисунку 2.10. Как видно, скорость коррозионного поражения металла от толщины пленки влаги на поверхности металла носит экстремальный характер. При влажности воздуха, составляющей 50–70 % и считающейся критической, на поверхности металла формируется сплошная пленка влаги при толщине более h_k . При этом резко возрастает скорость коррозии. Дальнейшее увеличение толщины пленки сопровождается снижением концентрации раствора электролита на поверхности металла и, как следствие, уменьшением скорости его коррозионного разрушения. В результате при мокрой коррозии скорость коррозии оказывается ниже, чем при влажной.

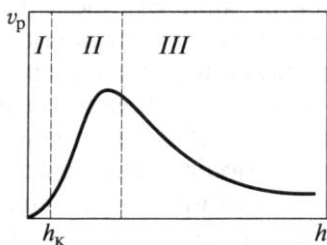


Рисунок 2.10 – Зависимость скорости разрушения металла от толщины пленки влаги на поверхности детали при воздействии атмосферной коррозии:
I – сухой; II – влажной; III – мокрой

Эта градация носит условный характер, поскольку довольно сложно выявить различия в условиях проявления различных видов атмосферной коррозии. Тем более, что в чистом виде атмосферная коррозия не встречается – ее скорость и интенсивность в значительной степени зависят от наличия примесей в воздушной среде, окружающей машины.

Атмосферная коррозия является наиболее распространенным типом электрохимической коррозии, которая наиболее активно протекает в промышленно развитых регионах. Имеются сведения о том, что скорость коррозионного изнашивания металлов в атмосфере промышленных предприятий в 5–10 раз выше, чем в сельской местности. Атмосферный воздух, содержащий влагу, газообразные и пылевидные включения, является весьма агрессивной средой. Конденсируясь из воздуха на поверхностях деталей и агрегатов машин, слой влаги с растворенными в ней промышленными загрязнителями превращается в сильный электролит, вызывая электрохимическую коррозию этих поверхностей.

При этом **интенсивность коррозионного разрушения** зависит от следующих факторов:

- 1) состава воздуха, типа и количества загрязнений;
- 2) температуры и относительной влажности воздуха, а также перепадов температуры;
- 3) силовой нагрузки на детали и конструкции, режима эксплуатации машины;
- 4) назначения, формы и материала детали, параметров шероховатости поверхности, метода ее обработки и улучшения;
- 5) особенностей конструкции сборочных единиц, сочетания материалов в подвижных и неподвижных сопряжениях;
- 6) типа соединений (разъемных или неразъемных), качества заклепочных, болтовых и сварных соединений;
- 7) наличия полостей (открытых или закрытых) и щелей в составных элементах, дефектов в сварных швах (непроваров и др.) металлоконструкций машины;
- 8) наличия и качества лакокрасочного или другого защитного покрытия.

С о с т а в в о з д у х а оказывает значительное влияние на скорость коррозионного разрушения. В промышленной атмосфере большинства предприятий присутствуют диоксиды углерода и серы, оксиды азота и сероводорода, а также другие газообразные загрязнения, которые существенно ускоряют процесс разрушения.

Существенную роль в усилении коррозии играют пылевидные твердые загрязнения, такие как угольная и песчаная пыль, соли и окислы металлов. Они способствуют ускорению капиллярной и химической конденсации влаги из воздуха на поверхностях металлоконструкций.

Как правило, для металлоконструкций машин, эксплуатирующихся на открытом воздухе, используют две основные группы материалов. Корпус-

ные и другие детали, не подвергающиеся постоянным или циклическим нагрузкам, изготавливают в основном из конструкционных сталей, защищенных от атмосферной коррозии лакокрасочными покрытиями. Для металлоконструкций кранов и других машин желательно использовать легированные нержавеющие стали, которые также защищают антикоррозионными покрытиями. Для большинства конструкционных сталей наиболее опасны примеси серы, сернистого газа, сероводорода и хлора.

Особенно интенсивно протекает коррозионное разрушение весной при таянии снегов, накопивших за зиму огромное количество пылевидных загрязнений промышленных предприятий и продуктов жизнедеятельности.

Температура окружающей среды также влияет на интенсивность коррозионного разрушения. В условиях нормальных показателей влажности и температуры окружающей среды скорость коррозионного поражения составляет 0,03–0,05 мм/год. Переход от отрицательных к положительным температурам является неблагоприятным фактором, поскольку он способствует конденсации на поверхностях влаги из воздуха. В диапазоне положительных температур (выше 0 °С) их повышение тормозит коррозию из-за снижения относительной влажности и сушки поверхностей деталей. Однако комплексное воздействие высокой влажности и повышенных температур интенсифицирует коррозионные процессы разрушения.

Наиболее опасна атмосферная коррозия для деталей и узлов машин, эксплуатирующихся в условиях больших нагрузок и хранящихся на открытом воздухе. К ним относятся металлоконструкции кранов (башенных, стреловых, козловых и др.), эксплуатация которых сопровождается накоплением усталостных повреждений. Сочетание усталостных и коррозионных процессов способствует ускоренному изнашиванию, а также возникновению очагов фреттинг-коррозии. При этом коррозия значительно снижает усталостную прочность деталей. Например, для тонколистовой стали Ст3 снижение усталостной прочности достигает 35–40 %. Об этом же свидетельствуют данные рисунка 2.4, где кривая усталости стали под влиянием коррозии просто вырождается.

Фреттинг-коррозия характерна для неразъемных соединений и других сопряженных деталей, в которых высокие динамические нагрузки сочетаются с очень малыми (часто колебательными) относительными перемещениями в условиях окисления и схватывания. На участках, пораженных фреттинг-коррозией, протекают процессы схватывания и усталостно-коррозионного разрушения. Этому виду коррозии подвергаются в основном резьбовые и заклепочные соединения.

Помимо этого, в первую очередь металл разрушается в стыках металлоконструкций, в которых скапливаются пыль и влага. К ним относятся заклепочные и болтовые соединения, несплошные сварочные швы. Кроме того, влага скапливается в различных полостях (открытых и закрытых). В частности, в козловых кранах очагами коррозии могут быть щели в составных элементах, узлы соединения пролетного соединения с

опорами, места крепления площадок на верхних поясах концевых балок. В целом коробчатые и трубчатые металлоконструкции кранов имеют значительно меньшую долговечность по сравнению с ферменными, в которых имеется свободный доступ к элементам конструкции.

Скорость коррозии сложно спрогнозировать из-за большого количества различных влияющих факторов. Значительно эффективнее *предупредить коррозию деталей и узлов машин* различными конструктивными и технологическими методами. К ним относятся:

- 1) введение легирующих добавок в состав сплавов, повышающих их коррозионную стойкость;
- 2) нанесение антикоррозионных покрытий;
- 3) герметизация сопряжений, устранение зазоров и полостей;
- 4) введение в состав смазочных материалов антикоррозионных присадок.

Имеются сведения [14], что из-за коррозии в Союзном государстве Российской Федерации и Республики Беларусь ежегодно теряется более 10 % выплавляемого черного металла. Кроме того, предприятия несут огромные расходы из-за вынужденных простоев машин в ремонте и снижения их производительности, а также из-за сокращения сроков службы их агрегатов, узлов и деталей. Поэтому борьба с коррозией является такой же общенациональной проблемой, как борьба с износом, поскольку убытки от ее воздействия становятся все более ощутимыми.

2.6 Повышение надежности деталей и конструкций

Для обеспечения требуемого или повышения существующего уровня надежности деталей и конструкций используют различные методы, которые целесообразно разделить на конструктивные, технологические и эксплуатационные.

Конструктивные методы предусматривают создание необходимых запасов прочности металлоконструкций, упрощение конструкций, использование стандартных деталей и узлов, обеспечение ремонтпригодности, обоснование применения методов резервирования и многое другое. К конструктивным методам повышения надежности и работоспособности относятся:

- 1) выбор сборочных единиц, узлов и агрегатов, обеспечивающих наиболее рациональную схему машины с сохранением работоспособности в широком диапазоне изменения рабочих параметров;
- 2) совершенствование конструкции деталей, узлов и механизмов машины, их проектирование под ресурсосберегающие технологии изготовления;
- 3) рациональная компоновка узлов и агрегатов машины, обеспечивающая необходимый уровень ремонтпригодности и упрощение технического обслуживания;
- 4) совершенствование схем унификации и агрегатирования блоков и сборочных единиц, повышение уровня стандартизации деталей, узлов и агрегатов машины;

5) выбор конструкционных материалов со стабильными и высокими физико-механическими характеристиками, расширение применения высокопрочных и высокомодульных композиционных материалов на основе полимерных, металлических и гибридных матриц и волокнистых наполнителей;

6) применение триботехнических (антифрикционных, фрикционных) материалов с высокой износостойкостью и стабильными значениями коэффициента трения для деталей узлов трения машин;

7) использование смазочных материалов, обеспечивающих работоспособность узлов трения машин в широком диапазоне рабочих нагрузок и скоростей.

Значительным резервом в обеспечении заданных параметров надежности является повышение точности оценки действующих при эксплуатации нагрузок и их влияния на работу различных механизмов машины, а также учет реальных условий, отражающих специфику работы машины (ее узлов, сборочных единиц и механизмов), что особенно важно при динамических нагрузках и неустановившихся режимах ее эксплуатации.

Важную роль в обеспечении работоспособности деталей в узлах трения машин играет их смазка. Она устраняет механическое и физико-химическое взаимодействие материалов трущихся поверхностей, способствует снижению интенсивности их изнашивания. В машинах в основном применяют жидкие, пластичные и твердые смазочные материалы. Наибольшее распространение имеют жидкие смазочные материалы, которые в зависимости от назначения разделяют на *моторные* (для ДВС), *трансмиссионные* (для элементов трансмиссий) и *гидравлические* (для гидропривода).

Смазочные материалы состоят из базового масла и присадок, улучшающих или изменяющих их функциональные характеристики. В зависимости от назначения и условий использования к смазочным материалам и рабочим жидкостям предъявляют общие и специфические требования. К общим требованиям относится наличие комплекса триботехнических (противоизносных, противозадирных и антифрикционных) и защитных (антикоррозионных, антиокислительных, вязкостных, антипенных и др.) свойств, к специфическим – набор эксплуатационных характеристик, обеспечивающих эффективную работу двигателя, трансмиссии или гидросистемы с учетом особенностей их эксплуатации.

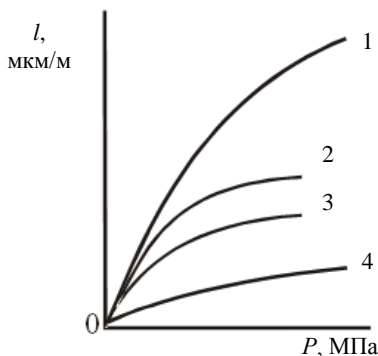
В последнее время расширяют использование синтетических моторных масел (полиалкингликолевых, фторуглеродных и хлорфторуглеродных, полисилоксановых и др.), которые отличаются высокими вязкостно-температурными свойствами. Для них также характерны высокая термостойкость и низкая испаряемость, высокий уровень антиокислительных и диспергирующих свойств, противоизносных и противозадирных характеристик. Их срок службы, как правило, превышает срок службы минеральных масел.

Снижение вредного влияния износа на работоспособность машины осуществляют за счет обеспечения благоприятных условий трения в узлах машин, повышения качества и упрочнения трущихся поверхностей, а также оптимизации характера внешних воздействий. К ним можно отнести реализацию трения качения вместо трения качения с проскальзыванием или вместо трения скольжения; эффективную защиту от абразивного загрязнения зубчатых и червячных передач, подшипников качения и скольжения, шарнирных соединений, опорно-поворотных устройств; замену открытых зубчатых передач закрытыми и др.

К триботехническим материалам узлов трения предъявляют требования повышенной износостойкости и стабильных значений коэффициента трения, что достигается высокими показателями механических характеристик, теплопроводности и теплостойкости, низким коэффициентом теплового расширения и хорошей прирабатываемостью.

На рисунке 2.11 представлены данные по влиянию упрочнения поверхностных слоев стальных деталей на интенсивность изнашивания, которые свидетельствуют о существенном снижении износа с ростом твердости стали во всем диапазоне удельных нагрузок в узле трения.

Рисунок 2.11 – Зависимость интенсивности изнашивания образцов из стали (У10) от удельной нагрузки при различных значениях твердости (HRC): 1 – 25–35 (без обработки); 2 – 35–55 (объемная закалка); 3 – 55–62 (цементация); 4 – 58–66 (нитроцементация)



Важным требованием к выбору материалов в паре трения является исключение возможности схватывания трущихся поверхностей, что обеспечивается применением смазочных материалов и обработкой одной из них (фосфатированием, сульфидированием или сульфацианированием, т. е. насыщением поверхностных слоев фосфором, серой, азотом и углеродом).

К **технологическим методам** повышения надежности можно отнести:

- 1) упрочнение поверхностных слоев деталей механическими, термическими, химико-термическими и другими способами;
- 2) нанесение упрочняющих, износостойких и коррозионностойких покрытий на детали машин.

Технологические методы позволяют на заключительных стадиях изготовления деталей машин повысить их прочностные характеристики (по по-

казателям статической и усталостной прочности), износостойкость, коррозионную стойкость, жаропрочность и другие свойства. Первичной задачей технологических методов является создание оптимального микрорельефа поверхности детали путем инструментальной *механической обработки*. Снижение шероховатости поверхности способствует уменьшению коэффициента трения, повышению циклической прочности и коррозионной стойкости.

В результате механической обработки деталей структура их поверхностных слоев меняется и становится неоднородной по глубине (рисунок 2.12). Различают следующие слои:

- граничный адсорбированный слой *A* толщиной до 3 нм, представляющий собой пленку из молекул газов, влаги, смазки и загрязнений;
- оксидный слой *B* толщиной от 0,2 до 5,0 нм, имеющий повышенную износостойкость и большую концентрацию пор и микротрещин;
- слой металла *C* толщиной до 5000 нм с сильно деформированной кристаллической решеткой (под влиянием высоких температур и механических нагрузок);
- слой *D* металла с исходной структурой.

Именно слой *C* является объектом поверхностного модифицирования (термического, химико-термического, термомеханического) и обеспечивает стальным деталям необходимый уровень эксплуатационных свойств, в том числе износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости.

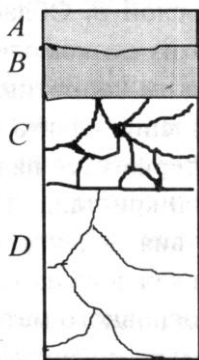


Рисунок 2.12 – Структура поверхностных слоев стали, сформированная в результате механической обработки

Следует отметить, что в узлах трения в процессе приработки устанавливается оптимальная топография сопрягаемых поверхностей деталей, которая фактически не зависит от исходного микрорельефа поверхности и обусловлена конструкцией узла и условиями его эксплуатации. Поэтому инструментальную механическую обработку следует проводить так, чтобы она давала топографию поверхности, близкую к оптимальной.

Химико-термическая обработка является упрочняющей тепловой обработкой стальных изделий в химически активных средах и проводится для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев. Она позволяет повысить твердость и износостойкость, усталостную и контактную выносливость, а также коррозионную стойкость.

Для повышения усталостной прочности и износостойкости широко используют *механические методы обработки* поверхности деталей (дробеструйную обработку, обкатывание шариками и роликами, алмазное выглаживание, дорнование и др.). В результате происходит наклеп, т. е. упрочнение поверхностных слоев металла при их пластическом деформировании, которое сопровождается изменением шероховатости поверхности. Толщина упрочненного слоя составляет 0,3–1,5 мм. При этом возрастает твердость на 20–40 % и повышается циклическая долговечность ряда деталей (зубчатых колес, осей, пружин и др.) в 2–10 раз. Износостойкость упрочненных слоев металла повышается до тех пор, пока он проявляет способность к пластическому деформированию.

Эффективным средством расширения функциональных возможностей деталей, узлов и машин является *применение покрытий* различного назначения: износостойких, коррозионностойких, защитно-декоративных, специальных. С помощью покрытий успешно решаются задачи, направленные на обеспечение комплекса эксплуатационных характеристик деталей в сопряжениях, включающего низкий коэффициент трения, хорошую приработку и исключение схватывания сопряженных поверхностей, высокую износостойкость в условиях повышенных температур и агрессивных сред.

К методам повышения надежности при эксплуатации относятся:

- 1) контроль соответствия технических характеристик машин режимам их эксплуатации;
- 2) совершенствование системы технического обслуживания, включая применение современных методов и средств технического диагностирования;
- 3) оптимизация организации всех видов ремонта с использованием современных ресурсосберегающих технологий восстановления деталей, узлов и агрегатов машин;
- 4) повышение квалификации и специальное обучение обслуживающего персонала;
- 5) применение эффективных методов восстановления работоспособности деталей с учетом их назначения, силовых нагрузок и режимов эксплуатации.

Более подробно методы повышения надежности и работоспособности машин будут рассмотрены в последующих разделах учебника.

Контрольные вопросы к разделу 2

- 1 Дайте определения основных показателей надежности машин.
- 2 Что такое работоспособное, неработоспособное и предельное состояния машины?
- 3 Отобразите графическую зависимость между безотказностью, ремонтпригодностью и долговечностью.
- 4 Как определить коэффициент готовности и коэффициент технического использования машины?
- 5 Назовите основные факторы физического старения машин.
- 6 Классифицируйте отказы машин по основным признакам.
- 7 Что такое предел выносливости материала?
- 8 Отобразите кривую Велера для различных сред испытаний.
- 9 Что такое эффект Ребиндера?
- 10 Назовите основные причины отказов узлов трения машин.
- 11 В каких условиях проявляются абразивное и усталостное изнашивание деталей?
- 12 Опишите зависимость износа от времени по кривой Лоренца.
- 13 Как определить ресурс детали в узле трения по кривой Лоренца?
- 14 Назовите основные классификационные признаки коррозионного разрушения конструкций машин.
- 15 В каких условиях атмосферная коррозия оказывает наибольшее влияние на конструкции машин?
- 16 Перечислите основные методы предупреждения атмосферной коррозии конструкций и деталей машин.

3

МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

При проектировании и конструировании выбор оптимального конструктивного решения должен учитывать особенности материалов и технологий изготовления, а также условия эксплуатации деталей и узлов машин. Конструкция машин всегда находится в неразрывной связи с материалами и технологией их изготовления. Создаются новые материалы, появляются новые методы их обработки и в соответствии с этим изменяются конструктивные исполнения. Поэтому при решении любой конструкторской задачи необходимо учитывать взаимосвязь и взаимовлияние конструкции, материалов и технологий (рисунок 3.1).

Функциональная целесообразность, т. е. принцип соответствия выбранного решения поставленной задаче, лежит в основе этого выбора. В частности, она предусматривает обеспечение минимально допустимых прочности и жесткости материалов конструкции, поскольку их повышение сопряжено с увеличением массы, удорожанием изготовления и эксплуатации машин и ее сборочных единиц. Вместе

с тем решение функциональной задачи должно базироваться на возможности выбора наиболее эффективного варианта из широкого спектра схем и конструкций. Так, для деталей привода систем управления и трансмиссий машин целесообразно (по возможности) использовать углеродистые стали, улучшенные термической или химико-термической обработкой, а также углеродистые стали с тонкослойными покрытиями из сплавов, обеспечивающих увеличение их износостойкости и коррозионной стойкости, взамен

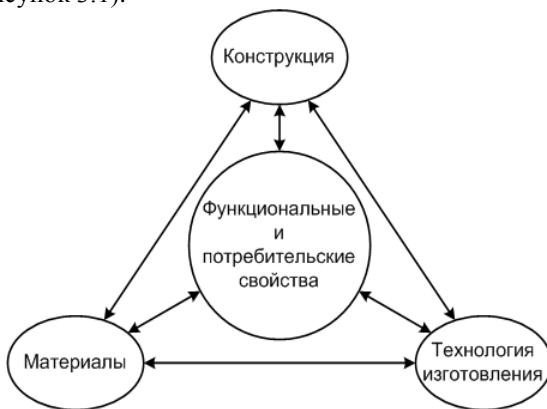


Рисунок 3.1 – Конструирование технического объекта

дорогостоящих легированных сталей. В качестве конструкционных материалов несильных и малонагруженных конструкций более целесообразно применять пластмассы и композиты на основе полимеров.

Штампованные и штампованно-сварные детали предпочитают литым деталям. Блочные конструкции, составленные из неразборных и неремонтируемых узлов, целесообразно использовать вместо конструкций из отдельных последовательно присоединяемых деталей.

Неразъемные, автоматически изготавливаемые соединения во многих случаях используют вместо разъемных, в частности, соединения на основе термоактивных полимерных клеев предпочитают болтовым. Уплотнение неподвижных стыков всё чаще осуществляют с помощью анаэробных герметиков на основе терморезактивных полимеров.

При возможности выбора механизмов и их приводов стремятся к упрощению структурных и кинематических схем и повышению эффективности работы, опираясь на принципы материало- и энергосбережения. Например, механизмы и приводы вращательного движения предпочитают устройствам, в которых присутствует возвратно-поступательное движение, а индивидуальный привод каждого исполнительного звена – общему приводу с разветвленной трансмиссией. Целесообразно использовать быстроходные малогабаритные приводы и механизмы из высококачественных материалов вместо громоздких тихоходных приводов из материалов с нестабильными прочностными характеристиками. Планетарные передачи с высоким КПД, как правило, предпочитают червячным передачам. Вместо колодочных и ленточных тормозов и муфт используют дисковые и многодисковые фрикционные тормоза и муфты.

Многопоточные системы с параллельным соединением приводов механизмов значительно эффективнее однопоточных последовательных систем. Кинематические схемы с разделением функций часто используют вместо совместной реализации различного вида движений или нагрузок. Следует отдавать предпочтение схемам с независимой передачей движения или распределения нагрузки.

Системы, требующие регулировки или подгонки взаимного расположения звеньев, являются менее эффективными, чем системы звеньев, опор и подвески агрегатов, обеспечивающие их самоустановку.

Одним из наиболее важных условий ресурсосберегающего конструирования является *премущественность технических решений*. Эффективность конструирования значительно повышается за счет оперативного и грамотного выбора прототипа и апробированных решений, а также совершенствования конструкций элементов узлов и машины в целом с учетом анализа накопленного опыта и перспективных технических решений. Для этих целей служат базы конструкций, материалов и технологий, а также базы данных об испытаниях и эксплуатации разработанных ранее конструкций.

Крупные производители машин обладают обширной интеллектуальной собственностью, сосредоточенной в закрытых компьютерных базах данных, что позволяет им оперативно модернизировать продукцию и осваивать новые поколения машин. Дальнейшее развитие отечественного машиностроения также связано с совершенствованием подобных систематизированных баз данных на основе патентной и научно-технической литературы.

3.1 Разработка проектно-конструкторской документации

Как уже отмечалось, жизненный цикл машины начинается зарождением идеи и формированием исходных требований, включает этапы проектирования и конструирования, изготовления и эксплуатации и заканчивается ее утилизацией. В свою очередь, каждый из этапов, как правило, является многоплановым, состоящим из нескольких стадий, требования к которым регламентированы стандартом СТБ 1218–2000 «Разработка и постановка продукции на производство».

Создание машины как технического средства, предназначенного для удовлетворения потребностей общества, основывается, прежде всего, на изучении потребности в такой машине и формулировании конкретных требований к ней. Далее следует этап проектирования, включающий в себя обоснование принципа действия, разработку структурной и конструктивной схем, выбор типов и параметров главных составных частей. На этой основе осуществляется конструирование, результат которого – выдача документации, достаточной для дальнейшего изготовления машины.

Задача разработчиков при проектировании и конструировании – создание новой машины, обеспечивающей выполнение заданного технологического процесса и обладающей лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с существующими машинами аналогичного назначения. Для успешного решения этой задачи конструкторы должны обладать точными сведениями о требованиях, предъявляемых к проектируемой машине, иметь представление о физической сущности выполняемых ею процессов, а также располагать исчерпывающей информацией о современном уровне развития соответствующей отрасли машиностроения. В ряде случаев для получения таких сведений необходима постановка специальных научных исследований.

Научные исследования должны сопровождать все этапы создания машин (рисунок 3.2) и включать изучение потребностей общества и разработку стратегических направлений по удовлетворению этих потребностей; обоснование требований к машинам, предназначенным для дальнейшего развития строительной и дорожной техники; внедрение новых технологических принципов, повышающих качество продукции и обеспечивающих снижение материало-, энерго- и трудозатрат при изготовлении; разработку методов рационального применения и содержания машин.

Важной частью научных исследований является *анализ и учет реальных нагрузок* на привод, рабочие органы, ходовую систему, узлы и агрегаты машины. Требования к приводам машин определяются условиями эксплуатации машин, особенностями технологии производства работ и режимами нагружения. Условия эксплуатации (в том числе работа в разнообразных и переменных природных условиях, которые характеризуются значительными колебаниями температуры и влажности воздуха, наличием пыли и абразивов, многообразием рельефа местности) обуславливают необходимость их высокой надежности и работоспособности. От технологии работ зависит последовательность включения, выключения и реверсирования движения механизмов машины.

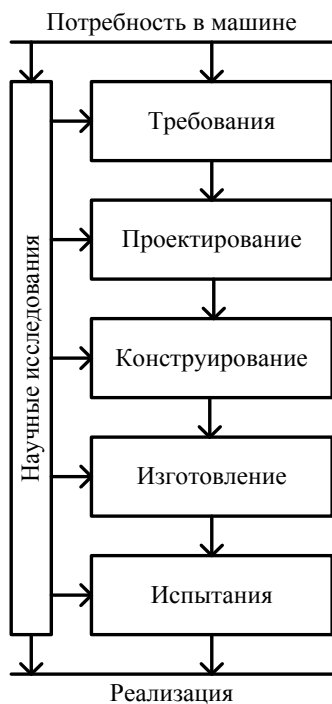


Рисунок 3.2 – Общая структура процесса создания машины

Режимы нагружения (продолжительность непрерывной работы, частота включений, внешние нагрузки) влияют на соотношение основных периодов работы (взаимодействие рабочих органов с грунтом или дорожно-строительным материалом) и переходных периодов (разгон, торможение, реверсирование, подъем, опускание). Приводы машин конструируют с учетом различных условий использования по нагрузке и времени работы, интенсивности проведения и степени ответственности операций, определяющих режимы работы.

Элементы привода силовых передач многих машин работают в условиях частого и кратковременного нагружения переменными силами и моментами, с частыми пусками и торможениями при максимальной нагрузке, а также в условиях ударного воздействия и вибрации. В общем случае привод должен обеспечивать максимальное использование установленной мощности при высоком КПД, воспринимать динамические нагрузки, легко и просто управляться.

Наибольшему воздействию подвержены рабочие органы, режимы нагружения которых существенно различаются в зависимости от назначения машины. При этом режимы нагружения элемента рабочего оборудования могут быть как стационарными, так и нестационарными случайными процессами. Например, в цепных траншейных экскава-

торах стационарным процессом является нагружение ведущей звездочки ковшовой цепи и элементов несущих металлоконструкций, а режимы нагружения ковшей этих экскаваторов являются нестационарными случайными процессами.

Разнообразие условий и режимов эксплуатации строительных, подъемно-транспортных и других машин не позволяет определить спектр универсальных нагрузок для любых режимов эксплуатации. Поэтому, как правило, выбирают типичные и характерные режимы и условия эксплуатации наиболее нагруженных элементов машин. Например, для кранов определяют нагрузки на механизмы подъема груза, передвижения самого крана или тележки, для погрузчиков – нагрузки на элементы ведущего моста и трансмиссию в период набора и подъема груза и передвижения груженого погрузчика и т.п.

От технической идеи и соответствующей заявки заказчика разработчику на создание машины до ее введения в эксплуатацию необходимо выполнить большой объем работ. В их числе ***поздняя разработка конструкторской документации*** (в соответствии с стандартом ГОСТ 2.103–68 «Единая система конструкторской документации. Стадии разработки» с изменениями, введенными в 2006 г.):

- 1) техническое предложение;
- 2) эскизный проект;
- 3) технический проект;
- 4) рабочая конструкторская документация:
 - а) опытного образца;
 - б) серийного (массового) производства.

Объем и содержание перечисленных этапов устанавливается техническим заданием. В нем регламентированы показатели качества и технические характеристики, а также технико-экономические требования, предъявляемые к разрабатываемой машине. В целом последовательность процесса создания машины показана на рисунке 3.3.

Техническое предложение – это совокупность конструкторских документов, содержащих техническое и технико-экономическое обоснование целесообразности разработки проектно-конструкторской документации на основании анализа технического задания, а также научно-технической и патентной литературы. Техническое предложение предусматривает предварительную конструкторскую проработку и анализ различных вариантов конструкций, подбор дополнительных материалов для выявления уточненных требований к машине. Варианты конструкций машины анализируют по основным показателям качества и технического уровня, в том числе по надежности, экономичности, эргономичности, технологичности, а также по уровню стандартизации и унификации.

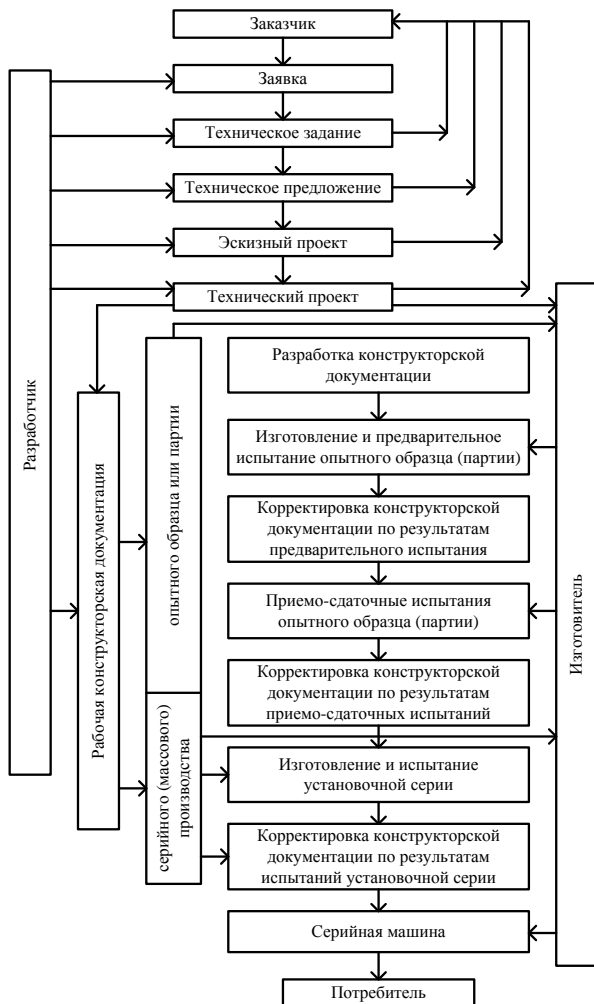


Рисунок 3.3 – Последовательность процесса создания машины

Согласованное и утвержденное техническое предложение – основание для разработки эскизного или технического проекта.

Эскизный проект – это совокупность конструкторских документов, содержащих концептуальные конструкторские решения, дающие общие представления об устройстве и принципе работы машины и ее основных частей. На этом этапе в результате опытно-конструкторской проработки общих ре-

шений машины рассматривают различные варианты компоновки машины в целом, а также ее составных частей. Глубина проработки должна быть достаточной для сравнительного анализа по показателям качества и технического уровня машины с учетом ее конструктивных и эксплуатационных особенностей. Разрабатываемые варианты проверяют на патентную чистоту и конкурентоспособность. При выявлении новых решений оформляют заявки на изобретения. Для проверки принципа работы принятого варианта машины и ее составных частей могут быть изготовлены и испытаны макеты.

В результате разработки эскизного проекта должен быть принят оптимальный вариант машины, подтверждены и уточнены предъявляемые к машине требования. Работы, выполненные на этой стадии при разработке технического предложения, находят отражение в пояснительной записке. Эскизный проект согласовывают с заказчиком и изготовителем. После согласования и утверждения эскизный проект является основой для разработки технического проекта и рабочей конструкторской документации.

Важной работой на этапе эскизного проектирования является приближенное (по укрупненным показателям с применением моделирования) определение параметров машины (массы и размеров рабочих органов и машины в целом, усилий и скоростей рабочих движений, мощности, теоретической и технической производительности и др.).

Большинство параметров проектируемой машины, как правило, можно определить путем анализа и корректировки известных данных уже разработанных машин (наиболее эффективных и прогрессивных), пользуясь *методом подобия*. Его сущность состоит в том, что основные параметры двух машин одинакового назначения (при схожих конструктивной и кинематической схемах) связаны следующими соотношениями:

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt[3]{\frac{m_1}{m_2}} = \sqrt[3]{\frac{N_1}{N_2}} = \sqrt[3]{\frac{q_1}{q_2}} = \frac{v_1}{v_2},$$

где A , m , N , q , v – соответственно линейный размер, масса, мощность, объем рабочего органа и скорость машин.

На основании этих соотношений можно получить формулы вида

$$A_1 = A_2 \sqrt[3]{\frac{m_2}{m_1}} = k_p A_2,$$

где $k_p = \sqrt[3]{\frac{m_2}{m_1}}$ – коэффициент пропорциональности.

Этими соотношениями можно пользоваться при соблюдении ряда условий:

1) конструктивно-кинематическое и технологическое подобие машин, их узлов и деталей;

2) подобие режима внешних нагрузжений (с учетом типоразмера разрабатываемой машины и машины-аналога);

3) необходимость снижения материало- и энергоемкости машины за счет применения новых (более качественных) материалов и технологий;

4) отбор в качестве аналогов лучших образцов мировой техники.

Наиболее детально метод подобия проработан для одноковшовых экскаваторов на гидравлической подвеске рабочих органов. Для всех размерных групп имеются подробные таблицы, связывающие главный параметр (емкость ковша) с другими характеристиками. Помимо этого, составлены простейшие эмпирические зависимости, позволяющие с учетом различных коэффициентов найти практически любой габаритный или рабочий размер одноковшового экскаватора.

Метод подобия активно используют в курсовом и дипломном проектировании, поскольку он позволяет в первом приближении определить основные характеристики машины, опираясь на отработанные и апробированные на практике технические характеристики машин того же типоразмерного ряда как отечественного производства, так и ведущих зарубежных производителей машин.

Технический проект – это комплекс конструкторских документов, которые содержат окончательные технические решения по разрабатываемой машине, дающие полное представление об устройстве и конструкции машины. При подготовке технического проекта осуществляют разработку конструкций машины и ее основных составных частей; проводят расчеты всех агрегатов, узлов и конструкций (в том числе технико-экономические); оценивают соответствие проекта требованиям технического задания; проверяют технологичность конструкции машины и ее основных частей (с учетом конкретных условий завода-изготовителя); осуществляют мероприятия по обеспечению заданного уровня стандартизации и унификации, а также по проверке патентной чистоты конструкции машины и ее основных частей. Габаритные, установочные и присоединительные размеры машины, а также возможности ее транспортирования и монтажа согласовывают с основным потребителем.

Если для изготовления отдельных оригинальных деталей нужно изготовить специализированное оборудование, для ускорения процесса в целом на стадии технического проекта разрабатывают чертежи сборочных единиц (куда входят эти детали) и самих деталей. Технический проект содержит те же основные конструкторские документы, что и эскизный проект. Однако степень и глубина их проработки носят окончательный характер. После согласования и утверждения технический проект является основанием для разработки рабочей конструкторской документации.

Рабочая конструкторская документация – завершающий этап проектирования и конструирования машины. Непосредственно по рабочей конструкторской документации на заводе-изготовителе создают машину.

На всех этапах разработки конструкторскую документацию подвергают

технологическому контролю, содержание и цели которого определяются стадией разработки. Так, на стадии технического предложения проверяют правильность выбора варианта конструктивного решения в соответствии с требованиями технологичности; на стадии эскизного проекта – правильность выбора принципиальной схемы машины, компоновку основных сборочных единиц, рациональность конструктивных решений с учетом простоты их изготовления, возможность применения рациональных методов обработки для наиболее сложных деталей; на стадии технического проекта – возможность проведения сборки и контроля машины и ее основных частей, удобство и доступность мест сборки, отсутствие (либо минимум) механической обработки при сборке, возможность обеспечения взаимозаменяемости сборочных единиц и деталей; на стадии разработки рабочей документации – технологичность изготовления деталей, сборки машины и ее составных частей, контроль наличия сборочных баз.

После того как проектная и конструкторская техническая документация разработана и проконтролирована, приступают к *изготовлению опытного образца машины* (или опытной партии). На опытном образце производят предварительные заводские испытания, в процессе которых отработывают рациональные эксплуатационные режимы, выявляют необходимость внесения изменений в конструкцию машины или ее составных частей. По результатам предварительных испытаний, которые проводят совместно разработчик и изготовитель, решают вопрос о возможности осуществления приемочных испытаний, корректируют конструкторскую документацию, вносят изменения в конструкцию опытного образца. При положительном решении проводят приемочные испытания, которые в зависимости от характера связи между соисполнителями могут быть ведомственными, межведомственными и государственными.

При *приемо-сдаточных испытаниях* (с участием разработчика, изготовителя и заказчика) устанавливают соответствие продукции разработанной технической документации и возможность постановки машины на производство.

Как известно, подготовка производства включает три комплексных этапа:

- конструкторскую подготовку;
- технологическую подготовку;
- календарное планирование производственного процесса изготовления изделий в установленные сроки, в соответствующих объемах и затратах.

Конструкторская подготовка, как было отмечено ранее, завершается разработкой конструкции машины и созданием чертежей с соответствующими спецификациями и другими конструкторскими документами в соответствии с требованиями ЕСКД.

Постановка на производство является комплексом мероприятий, регламентированных упомянутым стандартом СТБ 1218–2000 «Разработка и поста-

новка продукции на производство». Документ включает более 30 разделов, которые охватывают терминологию, качество и потребительские свойства, техническое состояние и патентоспособность, ресурсные показатели, стадии жизненного цикла продукции, опытно-конструкторские и опытно-технологические работы, сертификационные испытания, освоение производства, подконтрольную эксплуатацию, техническую документацию (включающую техническое задание на опытно-конструкторскую и научно-исследовательскую работу, патентные исследования, конструкторскую и технологическую документацию), рабочую документацию (включая совокупность конструкторских документов, предназначенных для изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации и ремонта), методику испытаний, ремонтные и эксплуатационные документы и т.п.

3.2 Общие правила и методика ресурсосберегающего конструирования

Основные правила ресурсосберегающего конструирования целесообразно разделить на несколько основных групп, охватывающих различные аспекты создания и функционирования машин: безопасность и надежность, экология и эргономика, энерго- и материалоемкость, а также технологичность. Для учета этих аспектов при конструировании необходимо:

1) для обеспечения безопасности функционирования машин:

– руководствоваться требованиями отечественных и международных стандартов по безопасности эксплуатации машин, охране труда и окружающей среды, включая рекомендации интегрированной системы менеджмента;

– шире использовать активные и пассивные средства защиты от механических, электрических, тепловых, звуковых и иных отрицательных воздействий на обслуживающий персонал и окружающую среду;

– совершенствовать системы управления механизмами и агрегатами с использованием бортовых компьютеров и микропроцессорной техники, в том числе системы электронного управления, регулирующего мощность двигателя в зависимости от нагрузки и защищающего от перегрузок;

– разрабатывать узлы со встроенными диагностическими устройствами с выводом данных о месте и характере неисправности на приборную панель или на дисплей бортового компьютера;

– активно внедрять методы контроля местоположения и управления рабочим циклом машин с применением спутниковых систем;

2) для обеспечения надежности конструктивных решений:

– использовать системный подход к анализу перспективных конструкций узлов машин в смежных областях машиностроения;

– предупреждать моральное старение машин, предусматривая резервы их развития и совершенствования с учетом перспективных запросов потребителей;

- совершенствовать расчеты деталей, узлов и конструкций с учетом реальных условий эксплуатации машин;
- моделировать исследования параметров и испытания основных систем проектируемых машин с помощью физического и компьютерного моделирования;
- применять конструкционные, триботехнические и коррозионностойкие материалы со стабильными эксплуатационными характеристиками;
- выбирать оптимальные конструктивные решения с учетом свойств материалов, технологий изготовления из них деталей и конструкций, а также условий их эксплуатации;
- совершенствовать узлы трения и подвижные сопряжения, подбирая оптимальные сочетания контактирующих материалов и смазочных жидкостей с учетом условий эксплуатации механизмов;

3) в области экологии и эргономики:

- разрабатывать конструкции (и проектировать технологические процессы их изготовления), способствующие уменьшению выбросов вредных веществ и негативного воздействия эксплуатации машин на окружающую среду;
- максимально использовать рециклируемые и рециклированные материалы, а также модульные системы, обеспечивающие эффективное разделение материалов и их утилизацию;
- обеспечивать комфортные условия труда операторов машин с учетом их антропометрических, физиологических и психофизических характеристик;
- делать доступными и удобными для осмотра узлы и механизмы, нуждающиеся в периодической проверке;

4) для снижения энерго- и материалоемкости:

- разрабатывать конструкции деталей, узлов и механизмов машин под ресурсосберегающие процессы их изготовления и сборки;
- шире использовать материалы с высокими показателями удельной прочности и жесткости, в том числе высокопрочные и высокомодульные композиты на основе полимерных и металлических матриц и армирующих волокнистых наполнителей;
- активно внедрять адаптивные материалы, приспособляющиеся к условиям эксплуатации деталей и конструкций машин;
- использовать методы улучшения и упрочнения углеродистых сталей взамен (по возможности) дорогих легированных сталей;
- обеспечивать необходимую прочность и жесткость деталей способами, не требующими увеличения массы (придаванием деталям рациональных форм, использованием пустотелых и оболочковых конструкций, блокированием деформаций поперечными и диагональными связями, рациональным расположением опор и ребер жесткости);
- предупреждать коррозию деталей применением стойких лакокрасоч-

ных и гальванических покрытий, изготовлением деталей из коррозионно-стойких материалов;

- оснащать машины энергосберегающими системами, обеспечивающими существенное снижение потерь энергии и экономию топлива;

- расширять применение эффективных физических, электрофизических и физико-химических методов воздействия рабочих органов для снижения энергопотребления при производстве строительных, земляных, дорожных и коммунальных работ;

5) для повышения технологичности:

- последовательно реализовывать принципы конструктивно-технологической преемственности, развивать и совершенствовать наиболее удачные технические решения;

- осуществлять максимальную унификацию элементов конструкций, расширять применение стандартных узлов и деталей, развивать принципы агрегатирования и блочно-модульной компоновки основных узлов и механизмов машин, упрощающие их обслуживание и ремонт;

- предусматривать возможность создания производных машин с максимальным использованием конструктивных элементов базовой машины; повышать универсальность машин за счет их оснащения сменным рабочим и вспомогательным оборудованием;

- оптимизировать число типоразмеров машин, добиваясь удовлетворения требований потребителей рациональным выбором их параметров;

- сокращать объемы механической обработки деталей; заменять механическую обработку способами, снижающими до минимума потери металла;

- конструировать машины с расчетом на эксплуатацию с устранением капитальных ремонтов и заменой восстановительных ремонтов комплектацией машин сменными узлами;

- упрощать обслуживание машин, конструируя механизмы в виде самообслуживающихся агрегатов;

- восстанавливать изношенные детали и конструкции эффективными и экономичными методами с учетом особенностей конструкции элементов и свойств их материалов.

Методика проектирования машин – это последовательность, приемы и правила оформления графических и текстовых документов при создании машин. Под этим термином понимают совокупность практических приемов проектирования. Этот процесс традиционно разделяют на непосредственно проектирование и конструирование. Это деление условно, поскольку некоторые аспекты создания машин являются для них общими.

Проектирование состоит в определении технологических функций машины, учете особенностей ее работы, рассмотрении различных вариантов принципиальной схемы и выборе оптимального решения, а также в разра-

ботке компоновки машины, ее общих видов и необходимых схем. *Конструирование* является следующей частью проектирования, в ходе которой определяется конструкция машины, ее сборочных единиц и деталей.

Разработка общей концепции будущей машины базируется на профессиональном опыте разработчиков, объективном анализе возможностей производства и сырьевой базы, предвидении перспектив развития данной отрасли машиностроения.

Выбору параметров машины предшествует исследование факторов, определяющих ее конкурентоспособность. Изучение опыта зарубежных и отечественных производителей машин позволяет провести сравнительный анализ их достоинств и недостатков, выявить особенности конструкции и эксплуатации, выбрать эффективные аналоги и прототип и разработать более совершенную конструкцию.

Важным условием эффективного проектирования является изучение проектно-конструкторских разработок, научно-технической и патентной литературы; изучение работ, проводимых научно-исследовательскими институтами соответствующей отрасли машиностроения; системный анализ зарубежных и отечественных патентов; использование эффективных разработок и новых технических решений из смежных отраслей машиностроения. Кроме того, изучают опыт наукоемких отраслей машиностроения (например, авиационной и космической техники), где высокие требования к качеству продукции обуславливают создание новых конструкций, эффективных методов повышения их работоспособности и высокопроизводительных способов их изготовления.

Проектированию машин должен предшествовать тщательный маркетинг с оценкой потребности в данной категории машин и вероятности появления новых технологических процессов и новых методов производства, динамики количественного и качественного развития промышленного, гражданского и дорожного строительства.

В результате обоснованного научно-технического прогноза определяют концепцию создания машины, обеспечивающую ее высокие технические свойства и конкурентоспособность на прогнозируемый период. После этого приступают к синтезу принципиальной схемы машины и установлению ее основных рабочих параметров. Для решения этих задач используют такие приемы поиска решений, как проведение системного анализа, использование морфологического метода, эвристический поиск и др.

Системный анализ, используемый в процессе создания принципиальной схемы машины, позволяет учитывать взаимосвязи элементов машины, а также работу машины в системе «оператор – машина – технология работ – окружающая среда». Для выявления рациональных конструктивных решений ответственных сборочных единиц и целесообразного диапазона параметров проводят морфологическое исследование машин конкретного типа или их сборочных единиц.

Морфологическое исследование (анализ и синтез) – это построение многофакторного множества вариантов решений и выбор наиболее приемлемого из них. При этом преимущество предполагает не копирование аналогов, а возможность использования наиболее прогрессивных конструктивно-параметрических решений, их развитие в соответствии с новизной поставленной цели.

Для генерирования новых конструктивных решений используют *эвристические методы поиска* (мозговой штурм, методы мгновенной оценки, трансформации и инверсии). Мозговой штурм предполагает сбор идей по конкретной задаче от компетентных лиц (специалистов в смежных областях техники), высказанные идеи совершенствуются при обсуждении. Их фиксируют, классифицируют по направлениям и анализируют специалисты.

Метод трансформации и инверсии состоит в обращении функций или форм системы (машины) или ее элементов. *Метод инверсии* занимает видное место среди приемов, облегчающих сложную работу конструирования. В узлах машин нередко бывает выгодным поменять детали ролями. Например, ведущую деталь сделать ведомой, направляющую – направляемой, охватывающую – охватываемой, неподвижную – подвижной. В ряде случаев целесообразно видоизменить форму детали, например, наружный конус заменить внутренним, выпуклую сферическую поверхность – вогнутой. В других случаях оказывается выгодным переместить конструктивные элементы с одной детали на другую, например, шпонку с вала – на ступицу, боек с рычага – на толкатель. Метод инверсии является неотъемлемым инструментом конструирования и значительно облегчает процесс поиска решений, в результате которого рождается рациональная конструкция.

Перечисленный комплекс работ (прогнозирование, системный и морфологический анализ, эвристический поиск), положенный в основу разработки требований технического задания, позволяет выбрать принципиальную схему машины, т. е. приступить непосредственно к поисковому проектированию и разработке технического предложения. При этом прорабатывают различные варианты машины, что позволяет выбрать оптимальное решение. Результатом поискового проектирования может быть усовершенствование известной модели либо принципиально новый вариант решения.

3.3 Особенности автоматизированного проектирования

Выполнение проектных работ, разработку конструкторской и технологической документации осуществляют с использованием *систем автоматизированного проектирования (САПР)* – организационно-технических систем, предназначенных для выполнения этих работ с применением компьютерной техники.

По назначению различают системы:

– *расчетов и инженерного анализа CAE (Computer Aided Engineering* – компьютерная инженерная поддержка), с помощью которой осуществляют автоматизированное функциональное и параметрическое проектирование машин;

– *конструкторского проектирования CAD (Computer Aided Design* – компьютерная поддержка конструктора), с помощью которой осуществляют автоматизированное конструирование узлов и деталей;

– *технологического проектирования CAM (Computer Aided Manufacturing* – компьютерная поддержка изготовителя), с помощью которой осуществляют автоматизированную технологическую подготовку производства к выпуску новой машины;

– *управления проектными данными PDM (Product Data Management)*, с помощью которой координируют работу систем *CAE, CAD* и *CAM*.

По типу базовой подсистемы различают САПР:

– *на базе подсистемы машинной графики и геометрического моделирования* (в основном системы *CAD*). Эти системы ориентированы на приложения, где основной процедурой проектирования является конструирование, т. е. определение пространственных форм и взаимного расположения объектов;

– *на основе систем управления базами данных (СУБД)*. Они ориентированы на приложения, в которых при сравнительно несложных математических расчетах перерабатывается большой объем данных. Такие системы преимущественно встречаются в технико-экономических расчетах и приложениях;

– *на базе конкретного прикладного пакета*. Фактически это автономно используемые программно-методические комплексы, например, имитационного моделирования производственных процессов, расчета прочности по методу конечных элементов, синтеза и анализа систем автоматического управления и т.п.;

– *комплексные (интегрированные) системы*, состоящие из совокупности подсистем предыдущих видов. Характерными примерами комплексных САПР являются *CAD* в машиностроении.

Перечисленные САПР являются сложными системами, состоящими из множества подсистем, условно разделяемыми на проектирующие и обслуживающие. Проектирующие подсистемы непосредственно выполняют проектные операции, в частности, подсистемы геометрического трехмерного проектирования, изготовления конструкторской документации и др. Обслуживающие подсистемы обеспечивают функционирование проектирующих подсистем, например, подсистемы управления проектными данными, подсистемы разработки программного обеспечения и др.

По сложности решаемых задач различают системы различных уровней:

– *нижнего (или легкие)* – для двумерной (2D) графики, т.е. для автоматизации преимущественно чертежных работ. Техническим обеспечением легких САПР являются персональные компьютеры; примером таких систем являются двумерные чертежные системы (такие как AutoCAD, MicroStation и др.);

– *среднего* – для разработки трехмерных (3D) твердотельных моделей. К таким программным комплексам относятся Inventor, Top Solid, Solid Works, Solid Edge, Компас-3D, Alibre Design, VariCAD;

– *верхнего (или тяжелые)* – для геометрического твердотельного и поверхностного моделирования. Оформление чертежной документации в них обычно осуществляют с помощью предварительной разработки трехмерных геометрических моделей. К ним относятся гибридные трехмерные программные продукты CATIA, NX (Unigraphics), Pro/ENGINEERING.

Однако следует отметить, что классификация по уровню сложности является достаточно условной, поскольку во многих системах среднего уровня появились средства поверхностного моделирования, а возможности персональных компьютеров стали приемлемыми для систем верхнего уровня.

Наиболее масштабное развитие САПР получили в CALS-технологиях – технологиях комплексной компьютеризации производства машиностроительной продукции на всех этапах ее жизненного цикла. CALS – Continuous Acquisition and Lifecycle Support – непрерывное сопровождение и поддержка жизненного цикла изделий). CALS представляет собой единую информационную среду всех этапов жизненного цикла продукции, которая дает единообразное представление о конструкции изделий и их характеристиках, о технологической оснастке, о технологиях производства, эксплуатации, обслуживания, ремонта и утилизации.

Создание единого информационного пространства обеспечивается унифицированными описаниями и интерпретацией данных независимо от времени и места их получения.

CALS имеет ряд подсистем обеспечения:

– *лингвистическое*, к которому относятся языки и форматы данных о промышленных изделиях и технологических процессах, используемые для представления и обмена информацией на этапах жизненного цикла изделий;

– *информационное*, составляющее базы данных (в том числе международные и национальные CALS стандарты) о существующих промышленных изделиях и процессах на всех этапах их жизненного цикла, включая утилизацию;

– *программное* – это совокупность программных комплексов, предназначенных для поддержки единого информационного пространства этапов жизненного цикла изделий;

– *математическое* – это методы и алгоритмы создания и использования моделей взаимодействия систем различных структур. Например, методы имитационного моделирования сложных систем, методы планирования процессов и распределения ресурсов;

– *методическое* – комплекс руководящих методик в процессах проектирования, производства и эксплуатации, а также системного анализа и синтеза сложных объектов;

– *техническое* – это аппаратные средства получения, хранения, обработки и визуализации данных при информационном сопровождении этапов жизненного цикла изделий;

– *организационное* – это совокупность документов, соглашений и инструкций, регламентирующих роли и обязанности участников жизненного цикла изделий машиностроения.

Основные виды продукции *CALS*-технологий представлены в форме маркетинговой, проектной, технологической, производственной и эксплуатационной документации. Соответственно, рассмотренные ранее системы проектирования вошли составной частью в единую информационную среду.

На *этапе маркетинга* применяют систему управления взаимоотношениями с заказчиками *CRM (Customer Requirement Management)*, которая включает базу данных о клиентах, партнерах и поставщиках.

На *этапе проектирования* используют упомянутые системы автоматизированного проектирования, которые подразделяют на системы функционального, конструкторского и технологического проектирования.

Функциональные системы автоматизации инженерных расчетов и анализа *CAE* представляют собой программные продукты, позволяющие при помощи расчетных методов оценить поведение компьютерной модели изделия в условиях эксплуатации.

Конструкторские системы автоматизированного проектирования *CAD* предназначены для создания электронных чертежей и трехмерных моделей, а также для конструкторской документации.

Системы технологического проектирования *CAM* используют для подготовки технологической документации и технологического процесса производства изделий (включая автоматизацию программирования станочного оборудования с числовым программным управлением).

Для управления проектированием и функционированием всех компонентов САПР используют системы управления данными об изделии *PDM*, которые позволяют обрабатывать инженерно-техническую информацию, необходимую на этапах проектирования и производства.

На *этапе производства* используют автоматизированные системы планирования и управления предприятием *ERP (Enterprise Resource Planning)*, включая разработку производственных процессов с учетом возможностей предприятия.

На *этапе реализации* используют системы продажи и сервисного обслуживания машиностроительной продукции S&SM (Sales and Service Management).

Кроме того, имеются системы управления поставками *SCM (Supply Chain Management)*, предназначенные для автоматизации и управления снабжением предприятия, а также системы установления связей с заказчиками, материального снабжения производства, диспетчерского управления производственными процессами и другие системы, обеспечивающие непрерывную компьютерную поддержку производства машиностроительной продукции, в том числе строительных, дорожных, подъемно-транспортных и других машин.

CALS-технологии включены в международные стандарты серии *ISO 10303 STEP – Standard for the Exchange of Product Model Data* (Стандарт по обмену данными о продукции). В *CALS* предусмотрены хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте с возможностью их правильной интерпретации.

Применение *CALS*-технологий обеспечивает единообразное описание и интерпретацию данных, независимо от места и времени их получения. Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартизованными. Тогда становится реальной успешная работа над общим проектом творческих коллективов, разделенных во времени и пространстве. Одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в различных проектах, а одна и та же технологическая документация адаптирована к различным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и производства.

CALS-технологии являются средством, интегрирующим промышленные автоматизированные системы в единую многофункциональную систему, обеспечивающую повышение эффективности создания и эксплуатации сложной техники.

При использовании *CALS*-технологий повышается качество изделий за счет более полного учета имеющейся информации при проектировании и организации производства. Так, обоснованность решений, принимаемых в автоматизированной системе управления предприятием (АСУП), будет выше, если имеется оперативный доступ не только к базе данных АСУП, но и к базам данных других автоматизированных систем, что позволяет оптимизировать планы работ, содержание заявок, распределение исполнителей, выделение финансов и т.п. При этом под оперативным доступом следует понимать не просто возможность считывания данных из баз данных, но и легкость их правильной языковой интерпретации. Это относится и к другим системам, например, технологические подсистемы должны при необходи-

мости воспринимать и правильно интерпретировать данные, поступающие от конструкторских подсистем.

Применение *CALS*-технологий сокращает материальные и временные затраты на проектирование и изготовление, а также уменьшает объемы проектных работ, так как описания эффективных разработок, проектировавшихся ранее, хранятся в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю. Доступность обеспечивается согласованностью форматов и способов в различных частях общей интегрированной системы. Значительно снижаются затраты на эксплуатацию, благодаря реализации функций интегрированной логистической поддержки; облегчается решение проблемы адаптации к меняющимся условиям эксплуатации.

В Беларуси работы по созданию информационных технологий и программного обеспечения осуществлялись в рамках *Государственной научно-технической программы «CALS-технологии»* (с 2006 года). В числе ее основных задач:

- создание нормативно-методической базы, регламентирующей электронный обмен данными;
- разработка и внедрение на предприятиях информационных систем, поддерживающих процессы жизненного цикла продукции;
- сокращение объемов опытно-экспериментальных работ, оптимизация технических характеристик изделий, снижение их материало- и энергоемкости;
- обеспечение информационно-технического перевооружения предприятий;
- уменьшение брака при проектировании и производстве изделий;
- сокращение затрат на эксплуатацию и ремонт изделий.

Информационные системы, поддерживающие процессы жизненного цикла продукции, внедрены на основных машиностроительных предприятиях Беларуси («Амкодор», МТЗ, МАЗ, БелАЗ и др.). Во взаимоотношениях между ведущими предприятиями становится нормой требование компьютерного представления (и обмена данными) о поставляемой продукции на всех этапах ее жизненного цикла. Белорусские предприятия в рамках международного сотрудничества, в частности, при продаже сложных наукоемких изделий и лицензий на их производство, также должны соблюдать требования стандартов *CALS* применительно к поставляемой с изделием технической документации в электронной форме. Компьютерная информационная поддержка должна быть обеспечена и для процессов технического обслуживания, материально-технического снабжения, заказа запасных частей и ремонта.

Таким образом, *CALS*-технологии в машиностроении решают следующие основные задачи:

- 1) создание единой структуры технической (маркетинговой, проектной, технологической, производственной и эксплуатационной) документации продукции машиностроения;

2) формирование единого информационного пространства на всех этапах жизненного цикла продукции и обеспечение эффективного управления и обмена данными;

3) разработка принципов моделирования и создание адекватных функциональных и структурных моделей сложных технических объектов (машин, агрегатов, механизмов, технологических процессов и др.).

Как видно из упомянутого перечня функций САПР, они давно вышли за пределы только проектирования и конструирования, охватывая все сферы производства и обслуживания продукции машиностроения. Следует отметить, что эти системы являются наиболее динамично развивающейся областью информационного обеспечения этапов создания и функционирования машин, что сказывается на оперативности информации.

3.4 Расширенное применение унификации, агрегатирования и блочно-модульной компоновки

В условиях рыночной экономики предъявляются высокие требования к продукции машиностроения, в том числе к строительным, дорожным и другим машинам, выпускаемым в Беларуси. Особую актуальность приобретают методы стандартизации как составляющие конкурентоспособности продукции. Кроме того, стандартизация и техническое нормирование решают вопросы удешевления продукции машиностроения за счет создания эффективных серийных производств стандартных деталей и агрегатов машин, имеющих улучшенные качественные показатели. Использование в эксплуатации стандартных и унифицированных деталей уменьшает их номенклатуру, что дает значительный экономический эффект.

Стандартизация – это установление обязательных технических требований (норм, правил) для решения повторяющихся задач. Она направлена на достижение оптимальной степени упорядочения в области разработки, производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации продукции (СТБ 1500–2004).

Техническое нормирование – это деятельность по установлению *обязательных* для соблюдения технических требований, связанных с *безопасностью* продукции и процессов ее разработки, а также производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации.

Основная цель технического нормирования и стандартизации – обеспечить безопасность человека и окружающей среды, техническую и информационную совместимость, взаимозаменяемость и унификацию продукции, единство измерений, гармонизацию (приведение в соответствие) методов стандартизации с принятыми в мировом сообществе, повышение качества продукции и экономию материальных ресурсов.

В машиностроении объектами стандартизации могут быть методы расчета, материалы и заготовки, технологические процессы изготовления деталей и сборки узлов, агрегаты и машины, их безопасность и экология. В качестве примера широты охвата рассматриваемых задач можно привести только некоторые стандарты на «Машины землеройные»: ГОСТ 27247–87 «Метод определения тяговой характеристики»; ГОСТ 27248–87 «Метод определения центра тяжести»; ГОСТ 30678–2000 «Правила испытания двигателей. Полезная мощность»; ГОСТ 30697–2000 «Органы управления оператора»; ГОСТ ИСО 3449–2005 «Устройство защиты от падающих предметов» и др.

Стандартизация и техническое нормирование формируют систему нормативно-правовых актов, определяющих требования к продукции (к ее разработке, производству и применению), а также контроль за правильностью использования этой документации. Эта система является постоянно обновляющейся структурой, которая должна учитывать современные достижения науки и технический прогресс в области машиностроения, глобализацию рынка, а также перспективные требования потребителей с учетом роли охраны окружающей среды.

При создании и функционировании машин стандартизацию осуществляют комплексно в двух основных направлениях:

а) в нормативно-техническом обеспечении всех стадий жизненного цикла машин (проектно-конструкторские работы, производство, эксплуатация, ремонт и утилизация);

б) в совокупной стандартизации сырья, материалов, комплектующих и готовых изделий.

На *стадии проектно-конструкторских работ* стандарты устанавливают единую систему конструкторской документации (ЕСКД), систему допусков и посадок (ЕСДП) и других конструктивных элементов, систему обозначений и кодирования. О значимости стандартизации на этой стадии свидетельствуют отечественный и зарубежный опыт: до 60–70 % брака продукции машиностроения связано с просчетами при проектировании и конструировании, а также с отклонениями от требований и правил нормативно-технической документации.

На *стадии производства* установлены единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП) и единая система технологической документации (ЕСТД), регламентированы методы испытаний опытных образцов. Выпуск продукции осуществляют в соответствии с требованиями стандартов на типовые технологические процессы и технологические режимы, влияющие на качество изделий. При производстве используют стандартное технологическое оборудование, оснастку и инструмент. Кроме того, стандартизированы методы контроля и испытаний, а также требования к средствам измерений.

На *стадии эксплуатации* регламентируют требования и нормы по основным потребительским свойствам машин, устанавливают правила их эксплуа-

тации (стандарты на системы технического обслуживания и ремонта в зависимости от назначения машин; определяют единую систему информации о качестве эксплуатируемой продукции.

Стандартизация должна обеспечивать создание оптимальной номенклатуры продукции машиностроения, которая в наибольшей степени отвечает интересам потребителей. Для решения этой задачи используют **системный подход**, основой которого являются:

- унификация;
- агрегатирование;
- параметрическая стандартизация;
- комплексная стандартизация;
- взаимозаменяемость;
- опережающая стандартизация.

Унификация – это рациональное сокращение разнотипных элементов одинакового функционального назначения. Целью унификации является уменьшение неоправданного многообразия деталей (а также конструкций, технологических процессов и др.) путем их преобразования в однотипные. Унификация базируется на систематизации, селекции, симплификации, типизации и оптимизации объектов стандартизации.

Систематизация предусматривает их расположение в заданном порядке, образующем четкую и удобную систему для пользователя. Разновидностью систематизации является классификация.

Селекция заключается в отборе конкретных объектов, признанных целесообразными для дальнейшего производства и применения.

Симплификация – это выявление объектов, которые нецелесообразно в дальнейшем использовать.

Типизация – это метод, основанный на разработке и использовании однотипных деталей, конструкций, узлов, методов расчета, методов проектирования и т.п.

Оптимизация предполагает определение оптимальных значений главных параметров, а также показателей качества и экономичности. Целью оптимизации является достижение оптимальной степени упорядочения и максимально возможной эффективности по выбранному критерию.

Унифицированными могут быть любые детали, сборочные единицы и узлы. К унифицированным элементам относятся посадки и квалитеты, резьбовые, шпоночные и шлицевые соединения, крепеж, подшипники и т. д. Унификации подлежат материалы, инструмент, технологическая оснастка, методы испытания и контроля, документация, нормы, требования, обозначения. В результате разрабатывают типовые формы конструкторских, технологических и эксплуатационных документов, альбомы типовых конструкций, перечни комплектующих изделий для готовой продукции, стандарты и ТУ.

Унификация рядов, деталей, узлов, агрегатов и машин предполагает их конструктивное подобие. Различают следующие виды унификации:

- внутриразмерная;
- межразмерная;
- межтиповая;
- заводская;
- отраслевая.

Внутриразмерная унификация представляет собой унификацию базовой модели и ее модификаций внутри одного типоразмера. Например, для автомобилей МАЗ степень внутриразмерной унификации составляет 82–93 %.

Межразмерная унификация – это унификация между различными размерами параметрического ряда базовых моделей или их модификаций, но внутри одного типа.

Межтиповая унификация является унификацией изделий различных типов и параметрических рядов. В качестве примера можно привести Минский станкостроительный завод, на котором унифицированы в один межтиповой ряд продольно-фрезерные, продольно-строгальные и продольно-шлифовальные станки на основе стандартной ширины обрабатываемых заготовок, устанавливаемых по ряду 10 (800, 1000, 1250 и 1600 мм). В этих станках использовано 45 % унифицированных узлов.

Заводская (в рамках завода) и *отраслевая* (для ряда заводов отрасли) *унификации* охватывают номенклатуру изделий, их составные части и детали, которые производят и применяют в различных отраслях народного хозяйства (*межотраслевая* унификация).

Характерным примером использования методов стандартизации являются строительные одноковшовые гидравлические экскаваторы. Как известно, их блочная конструкция в несколько раз сокращает сроки и трудоемкость монтажа экскаваторов и существенно повышает их ремонтпригодность.

По ряду узлов (двигатели внутреннего сгорания, электрические и гидравлические двигатели, гидроаппаратура и др.) унификация охватывает несколько соседних типоразмеров. По некоторым узлам (узлы и элементы управления, колеса, пневмодвигатели и др.) унификация охватывает большую часть различных групп. При этом экскаваторы обладают универсальностью, которая достигается большим числом различных сменных элементов рабочих органов, ковшей, рукоятей, наголовников стрел и др. Благодаря этому заводы изготавливают унифицированные ряды гидравлических экскаваторов, которые при наличии 10–12 базовых моделей имеют более 80 модификаций машин различного назначения. При этом количество деталей, необходимых для их выпуска, в 6–7 раз меньше числа деталей при индивидуальном производстве.

Пример уменьшения номенклатуры составных частей подвески ковша фронтального погрузчика путем преобразования геометрически и функцио-

нально подобных шарнирных узлов в однотипные приведен на рисунке 3.4. Каждая из двух рычажных частей подвески имеет пять схожих по конструкции шарнирных узлов, но различных по условиям нагружения (см. рисунок 3.4, а). Проектирование конструкции из условий оптимальной прочности предполагает выпуск пяти различных партий деталей по два комплекта шарниров. Если же унифицировать подвеску, тогда все шарнирные узлы принимаются равными наиболее нагруженному узлу (см. рисунок 3.4, б). При этом увеличенная металлоемкость конструкции подвески будет компенсирована существенным уменьшением расходов на производство с увеличенным объемом выпуска однотипной продукции (требуется изготовить только одну партию одинаковых деталей на десять комплектов).

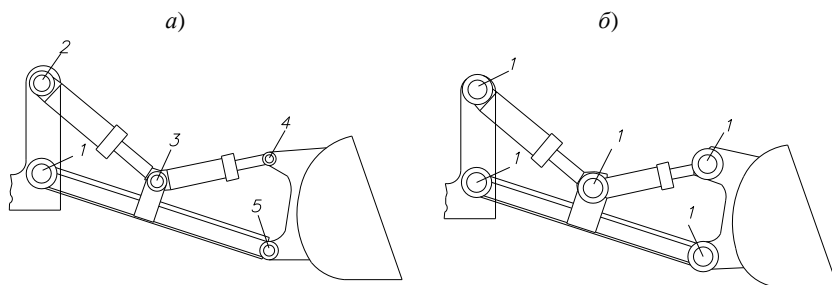


Рисунок 3.4 – Подвеска ковша фронтального погрузчика:
а – до унификации шарнирных узлов; б – после унификации

В ряде случаев межразмерную унификацию называют горизонтальной, а межтиповую – вертикальной. *Горизонтальная унификация* распространяется на машины одинакового назначения и предполагает использование однотипных узлов и деталей в рамках их модельного ряда. Например, в СНГ налажен серийный выпуск строительных одноковшовых экскаваторов различных размерных групп на базе единых конструктивных схем с широкой унификацией сборочных единиц и гидроаппаратуры. *Вертикальная унификация* не ограничивается одинаковыми машинами и охватывает однотипные детали, узлы и агрегаты машин различного назначения, например, погрузчиков и одноковшовых экскаваторов из подгруппы землеройных машин, бульдозеров и скреперов из подгруппы землеройно-транспортных машин.

Примером унификации может служить фронтальное погрузочное оборудование погрузчика-экскаватора Амкодор 702А, которое унифицировано с погрузочным оборудованием бульдозера-погрузчика Амкодор 133.

Для удовлетворения потребностей рынка строительных, дорожных и коммунальных машин на Минском тракторном заводе освоен выпуск универсальных транспортных шасси Ш-406, на базе которых создаются маши-

ны различного назначения для летнего и зимнего содержания дорог, очистки и мойки тоннелей и защитных дорожных экранов, машин с комбинированным пневмоколесно-рельсовым ходом.

Агрегатирование машин представляет собой метод конструирования машин, оборудования и приборов из унифицированных стандартных агрегатов (автономных узлов, устанавливаемых в изделия в различных комбинациях). На рисунке 3.5 представлена конструкция малогабаритного погрузчика с дополнительными элементами, которые позволяют реализовать агрегатирование (эти элементы выделены темным).

Многие машины и оборудование могут быть разделены на несколько автономных агрегатов, которые выполняют в различных машинах одинаковые функции.

Принцип агрегатирования имеет технологические (уменьшение времени на окончательную сборку машины) и эксплуатационные (ремонт машины заключается в замене неисправного агрегата) преимущества, несмотря на необходимость дополнительного объединяющего элемента, который усложняет конструкцию.

Одним из примеров агрегатирования может служить мобильное универсальное энергетическое средство УЭС-30 «Полесье» (ГСКБ ПО «Гомсельмаш»). Оно представляет собой пневмоколесный минитрактор мощностью 26,4 кВт (36 л.с.), который агрегируется с легкоъемными адаптерами для широкого спектра земляных, дорожных, коммунальных и других работ. В их числе погрузочный ковш, обратная лопата, траншеекопатель, вилочный погрузчик, снегоочистители плужный и роторный, уборочная машина и др. (всего 24 адаптера).

Для унификации систем машин и создания типоразмерных рядов и унифицированных семейств машин применяют *модуль конструирования*. Под модулем понимают унифицированную, или стандартную, сборочную единицу. Применение модульного принципа позволяет получить значительную экономию при создании новых машин за счет уменьшения объема работ и снижения их трудоемкости благодаря применению типовых технологических процессов, а при ремонте – за счет замены унифицированных элементов другими, предварительно изготовленными. Каждый из модулей можно использовать на любой машине унифицированного семейства машин.

Развитием принципа агрегатирования является *метод агрегатно-модульной компоновки* машин. Машины выполняют в виде специализирован-

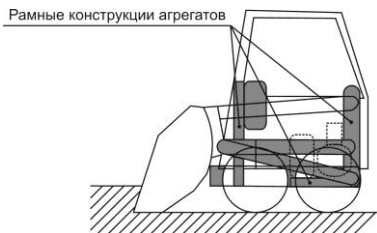


Рисунок 3.5 – Агрегатированная конструкция универсального малогабаритного погрузчика

ных комплектов универсальных модулей, выпускающихся крупной серией и потому относительно дешевых. Агрегатно-модульная компоновка получила широкое распространение в машиностроении. Например, агрегатно-модульные станки и промышленные роботы, являющиеся основой технологических линий, могут быть перенастроены на выпуск новой продукции за очень короткое время.

Принципы унификации и агрегатирования позволяют на основе базовой модели создавать производные машины одинакового назначения, но с различными эксплуатационными показателями или машины различного назначения, выполняющие качественно другие операции.

Взаимозаменяемость – это метод стандартизации, обеспечивающий сборку и эксплуатацию готовой продукции из независимо изготовленных деталей, модулей и агрегатов без нарушения требований к изделию в целом. Элементы изделий могут быть взаимозаменяемыми, если их параметры находятся в заданных пределах. Метод функциональной взаимозаменяемости определяет точность геометрических, физических и других параметров деталей и узлов на основе строго установленных связей между этими параметрами и потребительскими показателями. При этом предусматривается сборка изделий без предварительной подгонки смежных узлов и блоков с учетом системы допусков и посадок.

Взаимозаменяемость может быть полной, неполной, внешней и внутренней.

Полная взаимозаменяемость характеризуется соблюдением параметров такой точности, которая допускает сборку и замену любых сопрягаемых деталей, узлов, агрегатов без каких-либо дополнительных мероприятий (обработки, подбора или регулировки).

Неполная (ограниченная) взаимозаменяемость обеспечивается при проведении дополнительных мероприятий во время сборки: групповой набор деталей (селективная сборка), применение компенсаторов, регулировка положения, пригонка.

Внешняя – это взаимозаменяемость по эксплуатационным показателям, размерам и форме присоединения поверхностей покупных изделий и агрегатов между собой, а также с другими покупными изделиями.

Внутренняя – это взаимозаменяемость деталей, составляющих отдельные сборочные единицы и механизмы, входящие в изделие.

Уровень взаимозаменяемости является показателем технического состояния производства и характеризуется коэффициентом, определяющим отношение трудоемкости изготовления взаимозаменяемых деталей и частей к общей трудоемкости изготовления изделий.

Агрегаты, изготовленные независимо друг от друга, должны обладать полной взаимозаменяемостью по всем эксплуатационным показателям и присоединительным размерам, просто и надежно собираться с помощью

разъемных, резьбовых, шлицевых и других соединений. Собранные по агрегатному принципу машины и оборудование должны быть прочными, надежными, долговечными, виброустойчивыми.

Параметрическая стандартизация – это процесс стандартизации *параметрических рядов* машин, который заключается в выборе и обосновании целесообразной номенклатуры и численного значения параметров. Наиболее важными параметрами машин являются показатели, которые определяют ее назначение и условия использования:

- 1) размерные (габарит, длина, база, колея и т. п.);
- 2) массовые (грузоподъемность, масса машины и т. п.);
- 3) энергетические (мощность двигателя);
- 4) параметры, характеризующие производительность машин (скорость движения, вместимость ковша и т. п.).

Рациональное сокращение номенклатуры изделий предполагает разработку стандартов на параметрические ряды, которые представляют собой наборы установленных значений параметров. При выборе параметрических рядов опираются на следующие принципы:

- минимум количества основных параметров, чтобы не ограничивать процесс совершенствования конструкций и технологии изготовления изделий;
- стабильность (неизменность) параметров при конструктивных модификациях и технических усовершенствованиях;
- независимость от технологии изготовления, применяемых материалов и методик расчета.

Стандарты на параметрические ряды способствуют сокращению до целесообразного минимума конкретных типов моделей. Требования стандартов на параметрические ряды направлены на разработку технически более совершенных и производительных машин.

Одним из важных принципов параметрической стандартизации является *принцип предпочтительности*. Согласно этому принципу размеры конструкций должны совпадать с членами одного из рядов предпочтительных чисел. Наиболее удобными являются геометрические прогрессии. Основным стандартом в этой области является ГОСТ 8032 «Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел», который, в свою очередь, является базовым для ГОСТ 6636 «Нормальные линейные размеры», устанавливающего ряды чисел для выбора линейных размеров. Достоинством применения системы предпочтительных чисел является сокращение параметров однотипной продукции.

Разновидностью параметрического ряда является *типоразмерный ряд* машин, главным параметром которого является размер рабочего органа или характерный показатель машины. *Типоразмерный ряд* – это конструктивный ряд моделей машин одинакового назначения и конструкции, который содержит наиболее выгодное число типоразмеров. *Типоразмер* – это главный параметр машины, по которому составляют типоразмерный ряд.

При этом типоразмерный ряд должен содержать оптимальное число типоразмеров машин при минимальных затратах на их производство. Классическим примером типоразмерного ряда могут служить строительные одноковшовые экскаваторы. Этот ряд был разработан на основе анализа конструкций экскаваторов ведущих производителей землеройной техники. Его главным параметром является вместимость ковша, по которой определены восемь типоразмерных групп, охватывающих диапазон от 0,15 до 8,0 м³.

Комплексная стандартизация – это стандартизация, которая осуществляет и применяет систему взаимосвязанных требований к качеству готовых изделий и необходимых для их изготовления сырья, материалов, комплектующих узлов, а также к технологии производства и методам контроля. Она позволяет разрабатывать и реализовывать комплексы согласованных между собой нормативно-технических документов о стандартизации, регламентирующих нормы и требования к взаимосвязанным объектам стандартизации.

Для осуществления программы комплексной стандартизации помимо разработки стандарта на конечный продукт необходимо пересмотреть и разработать взаимосвязанные стандарты на сырье, материалы, полуфабрикаты, узлы, комплектующие изделия, запасные части, вспомогательные материалы, а также на технологические процессы, технологическую оснастку, орудия производства, методы и средства измерений, испытания и контроля, упаковку, транспортировку, хранение и эксплуатацию.

Опережающая стандартизация – это стандартизация, устанавливающая повышенные по отношению к уже достигнутому на практике уровню норм и требований к объектам стандартизации, которые согласно прогнозам будут оптимальными в последующее планируемое время. Ее объектами являются, как правило, наиболее важные виды продукции и процессы (нормы, правила, характеристики, требования), параметры которых могут изменяться в течение срока действия стандартов.

Обязательным признаком этого вида стандартизации является опережение по времени производства, которое может относиться как к изделию в целом, так и к наиболее важным показателям его качества, методам и средствам производства, испытания и контроля. Показатели качества, при которых заданная цель достигается с минимальными затратами и обеспечивается наибольший технико-экономический эффект при проектировании, производстве и эксплуатации изделий, должны быть оптимальными в планируемом промежутке времени.

Научно-технической базой опережающей стандартизации являются результаты научных исследований и новые технические решения (изобретения), которые приняты к реализации, а также методы оптимизации параметров продукции с учетом прогноза потребностей в ней.

Опережающие стандарты выполняют в виде ступенчатых стандартов, которые устанавливают нормы и требования к продукции с поэтапными сроками их введения и возрастающими требованиями к показателям качества.

3.5 Экологические приоритеты при проектировании и конструировании

Конкурентоспособность новой техники во многом зависит от ее экологической безопасности, современные требования к которой заставляют пересмотреть традиционные методы проектирования, производства, эксплуатации и утилизации машин, а также методы стандартизации и сертификации.

Серия международных стандартов *ISO 14000 «Система экологического управления»* включает организацию системы экологического управления и аудита, а также оценку экологичности производства и продукции на всех стадиях жизненного цикла. Оценка экологической безопасности машин, а также направления для совершенствования их конструкции («конструирование для экологии») осуществляются на основе **концепции полного жизненного цикла (ПЖЦ)**.

Термин «конструирование для экологии» (*Design for the Environment*) показывает важность экологического аспекта создания и функционирования машин, т. е. уже на начальном этапе создания машин планируются мероприятия (материаловедческие, конструкторские, технологические и эксплуатационные) для обеспечения экологической безопасности и энергосбережения.

Концепция ПЖЦ состоит в том, что *экологическая безопасность является приоритетным звеном взаимосвязи всех этапов жизненного цикла машин*, включая их утилизацию. При этом эффективность утилизации машины по окончании срока ее эксплуатации является основой для упомянутых мероприятий по экологической безопасности, которые реализуются на предстоящих утилизации этапах жизненного цикла машины.

В общем виде жизненный цикл машины приведен на рисунке 3.6.

Общей целью оценки экологической безопасности машин является определение направлений улучшения экологических показателей машин на всех стадиях жизненного цикла. На практике часто возникает необходимость оценки влияния тех или иных усовершенствований конструкции машины на ее экологические показатели (например, применения каталитических нейтрализаторов, систем впрыска топлива, шин с уменьшенным сопротивлением качению, обтекателей и т. д.). Помимо выявления влияния модернизации на экологическую безопасность, такие оценки позволяют сопоставить различные варианты конструкции машин, существенно отличающихся друг от друга (например, машины с различными силовыми установками – дизельной, бензиновой, гибридной; транспортные средства в двух- или трехосном исполнении и т. п.).

Оценку экологического ущерба, наносимого окружающей среде вредными выбросами, можно использовать при обосновании выбора методов

улучшения экологических показателей машин и их составных частей. Так, например, уменьшение расхода топлива и выброса вредных веществ в условиях эксплуатации может быть достигнуто уменьшением массы машины, снижением сопротивления движению, улучшением технических показателей и КПД двигателя.

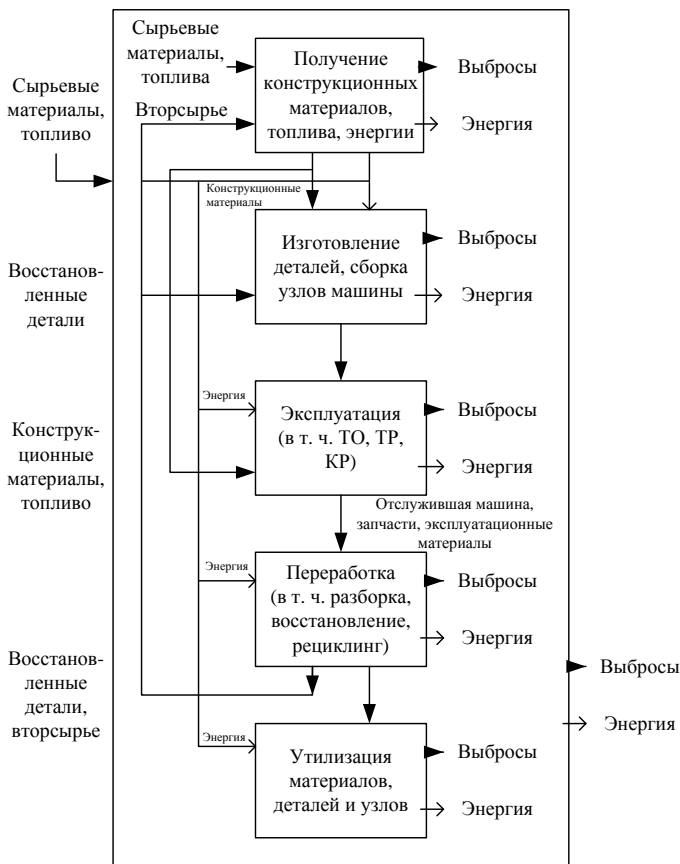


Рисунок 3.6 – Схема жизненного цикла машины с потоками материалов и энергии (выбросы – это любое загрязнение окружающей среды)

Как отмечалось, важной стадией полного жизненного цикла машины является ее утилизация по окончании срока службы. В 1997 г. Совет Евросоюза принял директиву «Транспортные средства, вышедшие из эксплуатации» (97/с 337/02) и дополнения (1999 г.) к ней. В основе этих мероприятий –

установление мер по предотвращению образования отходов, связанных с выводом из эксплуатации машин, а также с их повторным использованием, рециклированием и другими формами восстановления.

Государства-участники обязаны гарантировать воплощение в жизнь этих мероприятий по предотвращению негативного воздействия, наносимого окружающей среде отслужившими свой срок машинами. В их числе:

- совместный контроль (производителей машин, материалов и оборудования) использования вредных веществ в машинах и сокращения их содержания до минимально возможного количества;

- совершенствование концепции создания машин с учетом необходимости предотвращения выбросов в окружающую среду, упрощения процесса рециклирования и предотвращения захоронения опасных отходов;

- проектирование и производство машин, приспособленных к разборке, повторному использованию и утилизации по окончании срока службы.

С 2015 г. машины должны не менее чем на 95 % по массе утилизироваться путем рециклинга материалов, повторного использования отдельных узлов и деталей либо сжиганием отходов (с регенерацией энергии). При этом на повторное использование или рециклинг должно идти не менее 85 % массы машины. Кроме того, введены очень жесткие ограничения на количество (в абсолютных величинах или по концентрации) опасных и вредных веществ в различных узлах и агрегатах машин. В их числе кадмий, свинец, ртуть и шестивалентный хром.

Экологические стандарты по ПЖЦ требуют новых подходов к разработке техники. Концепция «конструирование для экологии» содержит следующие рекомендации:

- 1) использование рециклируемых и рециклированных материалов;
- 2) проектирование технологических процессов, способствующих снижению энергоемкости и уменьшению выбросов вредных веществ;

- 3) использование материалов, которые не требуют дополнительной обработки (доводки) поверхности деталей;

- 4) совершенствование технологических процессов с целью минимизации образования отходов и их повторного использования (в том же производственном цикле);

- 5) разработка модульных конструкций машин для упрощения разборки и замены узлов с повторным использованием отдельных узлов машины после их восстановления;

- 6) разработка конструкции, обеспечивающей при утилизации машины простое и удобное разделение различных по природе материалов.

Ведущие производители машин принимают меры по введению в практику требований ПЖЦ по утилизации машин, вышедших из эксплуатации. Наиболее впечатляющие результаты имеют автомобилестроители, например, в фирмах «BMW», «Volvo», «Fiat», «Ford» и «Nissan» степень повтор-

ного использования материалов достигает 85–90 %. Там разработаны стандарты предприятий по «конструированию для рециклинга», а также руководства по разборке и утилизации машин по окончании срока их службы. Агрегаты и сборочные единицы машины проектируются таким образом, чтобы снизить время, требуемое для их разборки, а также уменьшить количество агрегатов, которые разбираются только путем предварительной разборки других агрегатов.

Контрольные вопросы к разделу 3

1 Назовите и опишите этапы разработки проектно-конструкторской документации при создании машины.

2 Как связаны между собой параметры двух машин одинакового назначения, имеющих схожие конструктивные и кинематические схемы?

3 Какие преимущества обеспечивают *CALS*-технологии при создании и функционировании машин?

4 Что такое стандартизация и техническое нормирование, их основные задачи в области машиностроения?

5 За счет чего ЕСТД, ЕСТПП и ЕСТД влияют на качество машиностроительной продукции?

6 Что такое унификация сборочных единиц и как она влияет на работоспособность машин?

7 Что такое агрегатирование и агрегатно-модульная компоновка машины?

8 Назовите виды взаимозаменяемости и их достоинства.

9 Приведите примеры типоразмерных рядов машин для земляных работ, подъемно-транспортных и дорожных машин.

10 В чем состоит концепция полного жизненного цикла машины?

4

ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННЫХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ

Одним из современных направлений развития машиностроения является снижение материалоемкости машин за счет применения легких материалов, а также материалов с высокими показателями удельной прочности.

Материалы с малой плотностью, т. е. легкие материалы, широко используются в различных отраслях машиностроения. Применение легких материалов позволяет снизить массу, увеличить грузоподъемность, повысить производительность и другие эксплуатационные характеристики.

Основными легкими конструкционными материалами являются пластические массы, композиционные материалы на основе полимеров, цветные металлы – Вe (бериллий), Al (алюминий), Ti (титан), Mg (магний) и сплавы на их основе.

Особенно важным является сочетание высоких показателей прочности (σ_b) и жесткости (E) материалов с их малой плотностью (ρ), что позволяет снизить массу конструкций. В этом случае основными критериями при выборе конструкционных материалов являются удельные показатели прочности (σ_b/ρ) и жесткости (E/ρ).

Как видно из таблицы 4.1, эти характеристики легких металлических сплавов существенно различаются. Сплавы на основе Al и Mg (а также пластмассы) используют для несилевых конструкций и малонагруженных деталей машин.

Таблица 4.1 – Удельные показатели прочности и жесткости материалов

Материал*	σ_b , МПа	$\sigma_b/(\rho g)$, км	$E/(\rho g) \cdot 10^{-3}$, км
МА10 (магний)	430	21	2,3
В96 (алюминий)	700	23	2,4
BT15 (титан)	1500	30	2,6
Бериллий	680	37	16,1
Ст3 (железо)	430	5	
Сталь 30 (железо)	500	6	
30ХГСА (железо)	1100	14	
03Н12К15М10 (железо)	2500	32	
ЖБ470** (железо)	400	5	

* В скобках указан основной компонент сплава.
 ** Сталь, спеченная методом порошковой металлургии ($\rho = 7,2 \text{ кг/м}^3$, пористость –7,5–9,5 %).

Материалы с высокой удельной прочностью (сплавы на основе Ti, Be и др.) применяют для силовых конструкций и средне- и тяжело нагруженных деталей.

Стали (см. таблицу 4.1) имеют удельную прочность в довольно значительном диапазоне показателей благодаря широким возможностям регулирования их состава и структуры. Поэтому они продолжают оставаться самыми распространенными материалами деталей и конструкций машин.

4.1 Материалы со стабильными свойствами для основных деталей и конструкций машин

Выбор материалов для деталей и конструкций машин является ответственной стадией процесса проектирования. Он обеспечивает требуемую надежность деталей, узлов и агрегатов в течение заданного срока службы. Сложные условия эксплуатации машин (циклические, динамические и ударные нагрузки, резкие температурные колебания, абразивное и усталостное изнашивание, коррозионное разрушение и др.) обуславливают жесткие требования к материалам.

Для изготовления деталей и конструкций машин используют стали (в виде листового и профильного проката, поковок и отливок), а также чугуны, цветные металлы и неметаллические конструкционные материалы.

Стали должны иметь однородные химический состав и структуру, стабильные физико-механические свойства, в том числе высокую прочность и достаточную пластичность, а также способность воспринимать термическую и химико-термическую обработку. Этими достоинствами обладают углеродистые, легированные и специальные стали.

В СНГ единые требования к составу и качеству сталей установлены государственными стандартами (ГОСТ), в США – Американским обществом испытания материалов (ASTM), во Франции – нормами Франции (NF), в Германии – немецкими промышленными нормами (DIN). Кроме того, на территории Евросоюза установлены европейские нормы (EN).

Конструкционные стали классифицируют по ряду признаков, в том числе по химическому составу, качеству, структуре, назначению и др.

По *химическому составу* стали разделяют на углеродистые и легированные. В зависимости от концентрации С (углерода) их подразделяют на следующие группы:

- низкоуглеродистые (до 0,3 % С);
- среднеуглеродистые (0,3–0,7 % С);
- высокоуглеродистые (более 0,7 % С).

В свою очередь, легированные стали в зависимости от содержания модифицирующих элементов разделяют:

- на низколегированные (до 5 % легирующих добавок);

- среднелегированные (5–10 % добавок);
- высоколегированные (более 10 % добавок).

По *качеству* их классифицируют на стали:

- обыкновенного качества;
- качественные;
- высококачественные;
- особовысококачественные.

Под *качеством стали* понимают совокупность свойств, которые определяются способом ее производства. В их числе однородность химического состава, структуры и свойств, которые зависят от степени раскисления и содержания вредных примесей S (серы) и P (фосфора).

По *степени раскисления* стали классифицируют на спокойные, полуспокойные и кипящие. Под *раскислением* понимают процесс удаления из жидкого металла кислорода (для предотвращения хрупкого разрушения стали при горячем деформировании). Его осуществляют введением в расплав Mn (марганца), Si (кремния) и Al (алюминия). *Спокойную* сталь раскисляют Mn, Si и Al, *полуспокойную* – Mn и Al, *кипящую* – только Mn.

Углерод оказывает определяющее влияние на свойства сталей. С увеличением содержания углерода (рисунок 4.1) существенно возрастают прочность и твердость, но снижаются деформационная способность и вязкость. Кроме того, углерод заметно изменяет технологические свойства сталей: с ростом его концентрации снижается способность сталей к деформированию и затрудняется их свариваемость. Поэтому важной задачей является достижение высокого уровня технологических свойств сталей при сохранении их прочностных характеристик.

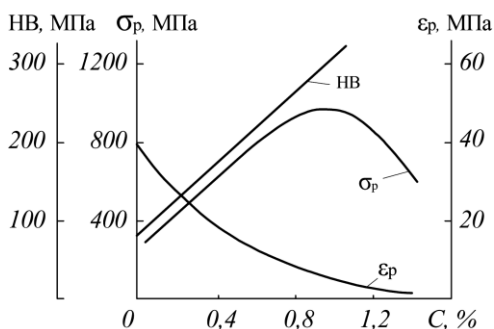


Рисунок 4.1 – Влияние содержания углерода на физико-механические свойства стали:

σ_p – прочность при растяжении; ϵ_p – относительное удлинение при разрыве; НВ – твердость по Бринеллю

Углеродистые стали обыкновенного качества являются наиболее дешевыми, технологичными и имеют прочность, достаточную для изготовления металлоконструкций различного назначения. Эти стали поставляют, как правило, горячекатаными в виде проката (прутки, листы, уголки, швеллеры, трубы и др.), свойства которого регламентированы ГОСТ 380–94.

Для слабонагруженных элементов металлоконструкций (кожухов, ручней, настилов, резервуаров и т. д.) применяют стали Ст0, Ст1, Ст2. Для изготовления таких деталей, как рычаги, скобы, муфты, шкивы и т. п., используют сталь Ст3. Крепежные изделия, слабонагруженные валы и оси изготавливают из стали Ст4; болты, тяги, малонагруженные валы и оси, зубчатые колеса, звездочки, траверсы, крюки – из стали Ст5; установочные винты, более нагруженные валы и оси, шестерни, шпонки, кованные катки, тормозные ленты, червяки – из стали Ст6.

Стали обыкновенного качества используют в металлоконструкциях, если их работоспособность определяется жесткостью, а необходимую прочность можно набрать за счет геометрических характеристик. В этих случаях основным материалом металлоконструкций кранов, других грузоподъемных и строительных машин является сталь Ст3, которая имеет хорошую свариваемость и дешевизну.

Однако при всех экономических достоинствах сталей обыкновенного качества предпочтение отдают качественным сталям, имеющим более стабильный состав и свойства. *Углеродистые качественные стали* имеют меньшее (по сравнению со сталями обыкновенного качества) содержание вредных примесей. Их поставляют в виде проката, поковок и других полуфабрикатов с гарантированными химическим составом и прочностными свойствами (см. таблицу 4.1). Эти и другие показатели сталей регламентированы ГОСТ 1050–88.

Малопрочные и высокопластичные стали 08 и 10 применяют для холодной штамповки изделий (шайб, прокладок, кожухов и др.). Из них также изготавливают детали кабин и кузовов (дверки, крылья, панели, крышки, глушители и др.),

Стали 15, 20 и 25 используют для изготовления деталей (кулачков, толкателей, валов и червяков рулевого управления, валов управления коробкой передач, карданных валов, шестерен и т. п.), которые должны иметь износостойкую поверхность и вязкую сердцевину. Их также используют для изготовления деталей относительно небольшой прочности (втулки, штуцера, крепежные детали, кронштейны и др.).

Среднеуглеродистые стали 30, 35, 40, 45, 50 и 55 отличаются большей прочностью, но меньшей пластичностью, чем низкоуглеродистые. После улучшения (закалки и отпуска) их применяют для изготовления деталей, работоспособность которых зависит от сопротивления усталости материала (шатунов, коленчатых валов малооборотных двигателей и компрессоров, зубчатых колес, маховиков, осей, гильз, поршней и штоков гидромашин и т. п.).

Легированные стали имеют гарантированный стабильный химический состав и механические свойства. Для легирования обычно используют хром Cr, никель Ni, титан Ti, молибден Mo, ванадий V, вольфрам W и др., а также Si и Mn, если их содержание превышает обычное для углеродистых сталей.

Напомним, что в марках сталей легирующие элементы обозначают следующими буквами: X – хром; Н – никель, Т – титан; М – молибден; Ф – ванадий; В – вольфрам; С – кремний; Г – марганец; Д – медь; П – фосфор; Р – бор; Ю – алюминий.

Легирующие элементы повышают конструкционную прочность сталей (или придают им специальные свойства) за счет влияния на соотношение и свойства фаз (феррита, аустенита, перлита и цементита), на растворимость углерода в аустените, на его содержание в перлите и другие параметры. Так, введение Si, Mn или Ni повышает твердость стали за счет искажения кристаллической решетки при замещении атомов железа атомами легирующей добавки, которая растворяется в феррите, составляющем ~ 90 % объема стали.

Улучшение механических свойств при введении легирующих элементов достигается *только в термически упрочненном состоянии* сталей – после закалки и отпуска. В отожженном состоянии легированные стали по физико-механическим свойствам практически не отличаются от углеродистых. В связи с этим обеспечение необходимой прокаливаемости (т.е. глубины закаленной зоны) является наиболее важным назначением легирования. Все легирующие элементы, кроме кобальта, увеличивают прокаливаемость. Совместное введение нескольких элементов существенно повышает прокаливаемость, например, введение хрома и молибдена, хрома и никеля, хрома, никеля и молибдена.

Если рассматривать их удельную прочность, то она превосходит подобную характеристику углеродистых сталей в 2,0–2,5 раза (см. таблицу 4.1) при одинаковой плотности. Это дает значительные технико-экономические преимущества деталям и узлам, изготовленным из легированных сталей. Например, изготовление ковша одноковшового экскаватора большой мощности из низколегированной стали (взамен углеродистой) позволяет увеличить его вместимость (соответственно и производительность машины) на 20–25 % или уменьшить массу ковша на 15 %.

Стали, которые применяют для несущих конструкций машин, должны иметь прочностные характеристики, обеспечивающие работоспособность конструкций в течение всего срока службы. Они должны иметь высокую прочность и жесткость, большое сопротивление циклическим и ударным нагрузкам, хорошую свариваемость, а также коррозионную стойкость. Этим требованиям отвечают низколегированные стали с содержанием углерода не более 0,25 %. В настоящее время основные несущие конструкции строительных и дорожных машин в основном изготавливают из низколегированных сталей (ГОСТ 19281–89). Их применение позволяет на 20–30 % умень-

шить массу конструкций и увеличить их срок службы за счет снижения динамических нагрузок.

Легированные стали применяют для основных средне- и тяжело-нагруженных деталей (кулачков, штоков, шатунов, осей, валов, зубчатых колес и т. п.) машин.

Низкоуглеродистые легированные стали используют для цементированных и нитроцементированных деталей (зубчатых колес, кулачков и др.), работающих в условиях трения. После насыщения поверхности углеродом, закалки и низкого отпуска детали из этих сталей приобретают твердую (58–63 HRC) поверхность при достаточно вязкой и прочной сердцевине, устойчивой к воздействию циклических и ударных нагрузок.

Среднеуглеродистые легированные стали приобретают высокие показатели физико-механических свойств после термического улучшения (закалки и высокого отпуска). Их применяют для большой группы деталей машин, работающих как при статических, так и при динамических, в том числе ударных, нагрузках.

Хромистую сталь (15X и 20X), а также дополнительно содержащую ванадий (15XФ) и бор (20XP), используют для изготовления небольших деталей (сечением не более 25 мм), работающих в условиях трения при средних нагрузках. Стали 40X, 45X и 50X применяют для тяжело нагруженных деталей, но работающих без значительных ударных и других динамических нагрузок. Их применение также ограничивается небольшими габаритами деталей. Они являются относительно дешевыми конструкционными материалами, обеспечивающими среднюю прочность (при невысокой вязкости).

К группе сталей повышенной прочности относятся комплексно-легированные стали с повышенным (0,25–0,30 %) содержанием углерода.

Хромоникелевые стали (12ХН3А, 12Н3А, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А) применяют для крупных (сечением до 100 мм) деталей ответственного назначения. Структура этих сталей обеспечивает сочетание высокой прочности и пластичности, что позволяет использовать их для тяжело нагруженных деталей, подвергающихся большому статическому и динамическому нагружкам.

Для деталей массового и крупносерийного производства без воздействия ударных нагрузок (например, зубчатых колес коробок перемены передач транспортных средств) применяют хромомарганцевые стали с титаном (18ХГТ, 30ХГТ) и молибденом (25ХГМ), сочетающие относительную дешевизну и прочность.

Буква А в конце марки стали обозначает повышенный уровень качества (т. е. пониженное содержание серы и фосфора).

Хромокремнемарганцевые стали (30ХГСА, 35ХГСА), содержащие по 1 % Cr, Mn и Si (так называемые хромансилы), также обладают упомянутым сочетанием дешевизны и прочности, что позволяет использовать их для изготовления деталей (сечением до 40 мм) транспортных средств (валов, элементов рулевого управления, сварных конструкций).

Для тяжело нагруженных деталей, подвергающихся динамической нагрузке, используют хромоникелевые стали (40ХН, 45ХН и 50ХН), которые обеспечивают высокий уровень механических свойств деталей (сечением до 50 мм), включая ударную вязкость.

Для крупногабаритных деталей особо ответственного назначения, эксплуатирующихся в тяжело нагруженных условиях (валы, зубчатые колеса редукторов), используют хромоникельмолибденовые и хромоникельвольфрамовые стали (40ХН2МА, 38ХН3МА, 38ХН3МФА и др.).

В отдельную группу выделяют подшипниковые стали, предназначенные для массового производства подшипников качения. Подшипники работают в условиях усталостного изнашивания и, как правило, при низких динамических нагрузках. Поэтому для их производства используют недорогие и технологичные хромистые стали (типа ШХ4, ШХ15, ШХ15ГС и др.), которые нередко легируют марганцем и кремнием.

Необходимость снижения массы машин и уменьшения их удельной материалоемкости требует еще большего увеличения прочности традиционных конструкционных материалов, что может быть достигнуто применением *высокопрочных легированных сталей*, имеющих $\sigma_b > 1500$ МПа (σ_b – временное сопротивление разрушению при одноосном растяжении, т. е. максимальная несущая способность материала).

Высокопрочное состояние в сочетании с достаточным запасом пластичности и вязкости, которое достигается использованием комбинации различных видов термической и термомеханической (высокотемпературная и холодная деформация) обработки, имеют следующие легированные стали:

- 1) среднеуглеродистые (после низкого отпуска или термомеханической обработки);
- 2) мартенситно-стареющие;
- 3) метастабильные аустенитные (трипстали).

Среднеуглеродистые (хромкремнемарганцевые 30ХГСА, хромоникелевые 40ХН, хромоникельмолибденовые 40ХН2МА и др.) стали, упрочненные термомеханической обработкой (пластическая деформация и закалка), обладают высокой прочностью ($\sigma_b = 2000 \dots 2800$ МПа) при достаточном запасе пластичности и вязкости. Эти стали имеют высокую стоимость, поэтому их применяют в настоящее время в основном в авиации, ракетной технике и судостроении для изготовления наиболее ответственных деталей.

Для деталей, работающих при циклических нагрузках, преимущественно используют улучшаемые стали – углеродистые (стали 35, 40, 45, 50, 55 и др.) и низколегированные (40Х, 40 ХН, 40ХН2МА, 35ХГСА и др.). Они обеспечивают работоспособность большой группы деталей: валов, валов-шестерен, осей, штоков, шатунов и др. Основой выбора стали для таких деталей служит предел выносливости в сочетании с удельной вязкостью и сопротивлением износу.

В ряде случаев вместо дорогих объемно-упрочненных высокопрочных сталей применяют относительно дешевые низко- и среднеуглеродистые стали, подвергнутые поверхностному упрочнению: 1) закалке с индукционным нагревом; 2) химико-термической обработке (цементации, нитроцементации или азотированию); 3) поверхностному пластическому деформированию (обкатке роликами, алмазному выглаживанию, дробеструйной обработке и др.); 4) комбинированным методом, включающим химико-термическую обработку и пластическое деформирование.

Чугуны (сплавы на основе железа с содержанием более 2,14 % С) сочетают высокие литейные свойства, прочность и износостойкость, а также дешевизну, что обеспечивает их широкое распространение в машиностроении. Их используют для производства качественных отливок сложной формы при отсутствии жестких требований к габаритам и массе деталей.

Серые ферритные чугуны (СЧ10, СЧ15) предназначены для мало- и средненагруженных деталей (крышки, фланцы, маховики; корпуса редукторов, подшипников, насосов, а также тормозные барабаны, диски сцепления и т. п.).

Серые ферритно-перлитные чугуны (СЧ20, СЧ25) используют для средне- и высоконагруженных деталей, работающих при статических и динамических нагрузках (блоки и поршни цилиндров, картеры двигателей, зубчатые колеса и др.).

Серые перлитные модифицированные чугуны (СЧ30, СЧ35) используют для высоконагруженных деталей, работающих при повышенных циклических и динамических нагрузках (зубчатые колеса, распределительные валы, гильзы блоков цилиндров и др.).

Высокопрочные чугуны (ВЧ35, ВЧ45 и др.) эффективно заменяют стали во многих конструкциях машин, из них изготавливают многие ответственные детали, работающие при высоких циклических нагрузках и в условиях интенсивного изнашивания (коленчатые валы, поршни и др.).

Из **цветных металлов** наибольший интерес представляют медные сплавы, в частности бронзы (оловянистые, алюминиевые, бериллиевые и др.) и латуни (сплавы меди с цинком). Оловянистые бронзы (Бр010Ф1), а также эти бронзы, легированные Zn и Pb (Бр05Ц5С5, Бр06Ц6С3), используют для монолитных подшипников скольжения, работающих при средних скоростях скольжения и значительных давлениях.

Алюминиевые бронзы, легированные Fe и Ni, используют для изготовления деталей, работающих в тяжелых условиях износа при повышенных температурах (элементов клапанов, шестерен, вкладышей, колец и др.). Из бериллиевой бронзы изготавливают детали, работающие на износ (кулачки, зубчатые шестерни, элементы червячных передач), а также подшипники скольжения, работающие при высоких скоростях, больших давлениях и повышенных температурах.

Латуни используют в зависимости от их структуры. Из однофазных латуней изготавливают детали, требующие по условиям эксплуатации

низкую твердость (шайбы, втулки, уплотнительные кольца и др.). Из двухфазных легированных латуней (ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2 и др.) изготавливают детали арматуры (гайки, тройники, штуцера и др.), а также втулки, вкладыши, венцы червячных колес и др.

Спеченные (по методу порошковой металлургии) материалы. Методами порошковой металлургии из них изготавливают детали, которые невозможно получить с помощью других технологий. В ряде случаев эти методы используют для получения деталей из материалов традиционного состава (сталей и чугунов), что дает значительное удешевление продукции, поскольку позволяет сократить технологические потери материалов при механической обработке.

К этим материалам относятся сплавы на основе Fe, тугоплавкие металлы, твердые сплавы на основе карбидов, антифрикционные и фрикционные материалы. Технологический процесс порошковой металлургии получения деталей включает следующие операции:

- получение порошков металлов;
- формование из них путем уплотнения при прессовании заготовок;
- спекание заготовок при температурах ниже температуры плавления основного компонента;
- окончательная обработка деталей (калибровка, обжатие, термообработка и др.).

Свойства спеченных материалов позволяют использовать детали из них в мало- и средненагруженных узлах машин и механизмов (см. таблицу 4.1). Как правило, детали имеют достаточно сложную конфигурацию (зубчатые колеса, звездочки, кулачки, крышки, фланцы и т. п.). Достоинством являются небольшие объемы механической обработки таких деталей.

Спеченные материалы на основе железа по своим триботехническим характеристикам близки к серым чугунам, но обладают лучшей прирабатываемостью.

Довольно широкое применение нашли спеченные антифрикционные материалы на основе железа (с добавкой серы) в качестве пористых подшипников скольжения. При жидкостной смазке работоспособность таких подшипников обеспечивается до нагрузок 2,0–2,5 МПа при скоростях скольжения до 1–2 м/с (т. е. при величинах фактора $pv = 2...5$ МПа·м/с). Их применяют в колесных парах тепловозов, в узлах трения строительных и подъемно-транспортных машин, а также транспортных средств.

4.2 Износостойкие материалы рабочих органов машин для земляных работ

К материалам рабочих органов в зависимости от условий эксплуатации машин предъявляются требования по различным свойствам: ударной и статической прочности, износо- и коррозионной стойкости. Рабочие органы строительных и дорожных машин работают в условиях интенсивного взаи-

модействия с грунтами и дорожно-строительными материалами. Поэтому определяющей характеристикой материалов рабочих органов является их износостойкость, которая, как правило, обеспечивается высокой твердостью поверхностных слоев.

Для **базовых элементов** (отвалов, ковшей, шнеков, фрез) используют высокоуглеродистые легированные стали, которые способны выдерживать ударные, циклические и динамические нагрузки. Легированные стали имеют гарантированный химический состав, стабильные механические свойства и обязательно подвергаются термической обработке.

Для **съёмных элементов** (наконечников зубьев и фрез, ножей), подвергающихся интенсивному абразивному износу, широко применяют *отливки* из высокомарганцовистых сталей. Они обладают повышенной износостойкостью и ударной вязкостью, поэтому их применяют для зубьев, корпусов и других деталей ковшей экскаваторов; отвалов бульдозеров и зубьев рыхлителей; звеньев, катков и колес гусениц тягачей; шестерен и реек напорных механизмов одноковшовых экскаваторов с гибкой подвеской; дробящих плит и других деталей дробильно-сортировочного оборудования.

Отдельную группу составляют **наплавочные материалы**, которые придают прочность, износостойкость и ударную вязкость элементам рабочего оборудования на глубину, обеспечивающую заданный ресурс их работы. В зависимости от химического состава их целесообразно разделить на следующие подгруппы:

- 1) низколегированные стали;
- 2) высоколегированные стали;
- 3) сплавы на основе железа;
- 4) композиционные материалы на основе железа и карбидов.

Низколегированные стали *первой группы* с содержанием легирующих элементов до 5 % применяют для *наплавки* деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, а также эксплуатирующихся при умеренных нагрузках и повышенных температурах (до 300 °С). Их наплавляют на зубья ковшей роторных экскаваторов, ножи бульдозеров и автогрейдеров, а также на детали ходовой части транспортных средств. В таблице 4.2 приведен химический состав наплавленных сталей.

Таблица 4.2 – Состав и твердость низколегированных сталей

Наплавленный металл	Содержание элементов, %							HRC
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Ti	
60X3	0,6	0,25	0,4	3,0	–	–	–	46–55
70X3CMH	0,7	1,0	0,9	3,0	0,6	0,5	–	55–60
70X3CMT	0,7	1,0	0,7	2,8	0,5	–	0,2	52–60
80X4C	0,8	1,3	0,8	4,0	–	–	–	56–62

Структура наплавленного металла представляет собой мартенсит с небольшим количеством игольчатого троостита и остаточный аустенит. Мартенсит является одним из самых твердых структурных образований в стали, но вместе с тем он склонен к охрупчиванию. Поэтому покрытия, полученные с помощью мартенситных наплавочных материалов, не рекомендуется использовать в условиях ударно-динамических нагрузок.

Высоколегированные стали *второй группы* используют для наплавки деталей, подверженных абразивному и ударно-абразивному изнашиванию, например, деталей рабочих органов землеройных, землеройно-транспортных машин и дробилок. В их числе высокомарганцевистые аустенитные стали, которые в результате наклепа при трении приобретают высокую износостойкость. При этом твердость поверхностного слоя повышается в 2–3 раза, а вязкость сердцевины не изменяется. В таблице 4.3 приведены химический состав и свойства высоколегированных сталей с высоким содержанием марганца. В их числе так называемая сталь Гатфильда (Г13), содержащая Mn в пределах 11,5–14,5 %. Она не обладает высокими сварочными характеристиками, поэтому ее легируют Cr, Ni, Mo и другими элементами для придания пластичности.

Таблица 4.3 – Состав и твердость высокомарганцевистых аустенитных сталей

Наплавленный металл	Содержание элементов, %					Твердость НВ после	
	C	Si	Mn	Cr	Ni	наплавки	наклепа
Г13	1,0	0,6	13,0	–	–	220–280	450–500
Г13Н4	0,8	0,5	13,0	–	4,0	170–230	400–450
Г13Х4Н3	0,8	0,4	14,5	3,8	3,4	160–200	420–460

При наплавке высокомарганцевых аустенитных сталей необходима высокая скорость охлаждения наплавленного металла для обеспечения чисто аустенитной структуры, поскольку при замедленном охлаждении по границам зерен образуются карбиды железа и марганца, которые снижают показатели пластичности.

Хромовольфрамовые и хромомолибденовые стали используют при восстановлении и упрочнении деталей, эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания при большом давлении (более 50 МПа), ударно-абразивного изнашивания. Это ножи отвалов бульдозеров и автогрейдеров, зубья ковшей роторных экскаваторов, резцы баровых машин для мерзлого грунта. В таблице 4.4 приведен состав хромовольфрамовых и хромомолибденовых сталей.

Высокое содержание карбидов хрома, вольфрама и молибдена обеспечивает стойкость стали по отношению к абразивному износу, который сопровождается несильными ударами. Большая устойчивость карбидов в сталях способствует сохранению высокой износостойкости наплавленного слоя даже при длительном контакте с раскаленным металлом.

Таблица 4.4 – Состав и твердость хромовольфрамовых и хромомолибденовых сталей

Наплавленный металл	Содержание элементов, %							HRC
	C	Si	Mn	Cr	N	Mo	V	
25X5ФМС	0,25	1,1	0,6	5,2	–	1,2	0,4	40–46
3X2B8	0,32	0,6	0,8	2,5	8,5	–	0,3	44–50
3X3B3M3Ф	0,30	1,0	0,7	3,2	2,5	2,4	0,7	44–48
5X4B3Ф	0,50	0,5	0,8	4,0	3,5	–	0,4	40–44
110X14B13Ф2	1,20	0,5	0,7	14,5	13,0	–	1,7	40–55

К третьей группе относятся высокохромистые чугуны, которые применяют для наплавки деталей, эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания. Это детали землеройных и землеройно-транспортных машин, а также строительных машин, в частности дробилок. Структура наплавленного металла состоит из карбидов Cr_3C_2 , Cr_7C_3 и Cr_3C_6 , а также остаточного аустенита и карбидной эвтектики. В таблице 4.5 приведены состав и свойства высокохромистых чугунов.

Таблица 4.5 – Состав и твердость высокохромистых чугунов

Наплавленный металл	Содержание элементов, %									HRC
	C	Si	Mn	Cr	Ni	N	Mo	Ti	B	
240X29C2P2	2,4	2,0	1,0	29,0	–	–	–	–	1,7	54–58
300X28H4C4	3,0	3,5	0,8	28,0	4,0	–	–	–	–	48–54
320X23C2ГТР	3,2	2,3	1,3	23,0	–	–	–	1,0	1,0	55–62
400X27H2BM	3,9	1,0	1,0	27,0	1,8	0,3	0,1	–	–	52–56
500X38CGH	4,9	2,1	2,0	38,0	1,4	–	–	–	–	55–60
350X26Г2P2CT	3,5	0,8	2,0	26,0	–	–	–	0,3	2,2	58–63

Наличие карбидов способствует возрастанию твердости и износостойкости наплавки, при этом повышаются хрупкость и чувствительность наплавленного металла к трещинам. Поэтому наплавку проводят с предварительным нагревом детали (выше 300 °С), а затем термообработку. Для предотвращения растрескивания наплавленного покрытия используют многослойную наплавку или наносят подслои из низкоуглеродистой стали.

К этой же (третьей) группе принадлежат *сплавы на основе железа* (таблица 4.6), легированные хромом и другими элементами.

Сплавы (80X20P3T и 180X6B8CT) обладают высокой стойкостью при абразивном изнашивании и выдерживают умеренные удары. Их используют для упрочнения зубьев ковшей одно- и многоковшовых экскаваторов, а также других машин для земляных работ.

Таблица 4.6 – Сплавы на основе железа

Наплавленный металл	Содержание элементов, %								
	C	Si	Mn	Cr	Co	W	Nb	Ti	B
80X20P3T	0,85	–	–	20,0	–	–	–	0,70	2,9
180X6B8CT	1,75	1,10	0,9	5,8	–	–	7,5	0,2	–

Хромокобальтовые сплавы (стеллиты) характеризуются износостойкостью и коррозионной стойкостью при температурах до 1000 °С. Их применяют для наплавки клапанов и других деталей двигателей внутреннего сгорания (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Состав и твердость хромокобальтовых сплавов

Наплавленный металл	Содержание элементов, %				HRC
	C	Cr	Ni	W	
110X28K64B4	1,1	28	–	4,0	42
140X29K58B8	1,4	29	–	8,0	47
230X30K51B12	2,3	30	–	12,0	54
250X32K44B17	2,5	32	–	17,0	58
25X27K61M5H3	0,25	27	3,0	<u>Mo</u> 5,0	20

Структура напавленного стеллита включает твердый раствор вольфрама и хрома в кобальте, а также эвтектику твердого раствора и двойного карбида, содержащего хром и вольфрам. С увеличением содержания углерода возрастает доля эвтектики в структуре, зернистость которой снижается.

Долговечность напавленного слоя зависит от чистоты поверхности упрочняемой детали. Поэтому при наплавке стеллита поверхность основного металла следует тщательно очистить от загрязнений (масла, окалины и др.). Для предотвращения образования трещин необходимы предварительный нагрев детали и ее медленное охлаждение после наплавки (в печи или под слоем теплоизоляционного материала).

Никелевые сплавы характеризуются износостойкостью и коррозионной стойкостью при высоких температурах. Кроме того, они отличаются хорошими технологическими свойствами. Их состав представлен в таблице 4.8.

Эти сплавы характеризуются износостойкостью при обычных и повышенных температурах, поэтому их применяют для восстановления и упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания, эксплуатирующихся в неблагоприятных условиях. В частности, разработаны технологии плазменной наплавки выпускных клапанов и индукционной наплавки гильз цилиндров.

Таблица 4.8 – Состав никелевых сплавов

Наплавленный металл	Содержание элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	Nb	Ti	Cu	B	Fe
35X13H80C2P2	0,35	2,5	0,8	12	–	–	–	–	–	1,8	1,5
55X15H75C3P3	0,55	3,0	0,8	15	–	–	–	–	–	2,5	4,0
80X17H70C4P3	0,80	3,8	0,8	17	–	–	–	–	–	3,3	4,5
200X26H60B9	2,0	0,8	0,8	26	9,0	–	–	–	–	–	3,0

К четвертой группе износостойких сплавов относятся *композиционные материалы*, состоящие из матрицы и твердых частиц, которые вводят в

матрицу в процессе наплавки. Как правило, в качестве упрочняющих частиц используют карбиды вольфрама, которые по твердости превосходят карбиды большинства металлов при достаточно высокой пластичности.

В качестве матрицы используют различные сплавы, обеспечивающие хорошее смачивание зерен карбидов, достаточную прочность и вязкость. Для этого применяют сплавы на основе никеля и меди, легированные (на основе хрома) чугуны и стали.

4.3 Композиты с комплексами особых свойств

В качестве конструкционных и триботехнических материалов в основном используют сплавы черных и цветных металлов, достоинства которых общеизвестны. Вместе с тем с их помощью невозможно решить все проблемы, которые ставит перед материаловедением современное машиностроение, особенно в плане ресурсосбережения.

Во многом снижение материалоемкости и энергоемкости техники связано с разработкой и эффективным использованием композиционных материалов (композитов), а также с объемами производства и потребления изделий из них. Это направление современного материаловедения – композиционные материалы (КМ) и изделия из них – отнесено к одному из приоритетных направлений развития науки и техники Беларуси.

Применение композитов обеспечивает новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей энергетических и транспортных средств, уменьшении металлоемкости машин и механизмов.

Итак, **композиционные материалы** – это материалы сложного состава, состоящие из двух и более разнородных компонентов с границей раздела между ними. Компонент, непрерывный по всему объему композиционного материала и обеспечивающий его монолитность, называют **матрицей** (от лат. *matrix* – начало, основа). Матрица является основой КМ. Она связывает наполнители, определяет форму изделия, его монолитность и теплостойкость, электро- и триботехнические свойства, герметичность и химическую стойкость.

Компоненты, распределенные в матрице, называют **наполнителями**. Они чаще всего играют роль армирующих элементов, которые воспринимают основную долю нагрузки и определяют прочность, жесткость и твердость КМ, а также влияют на их фрикционные, магнитные, теплофизические и электрические свойства.

Композиты классифицируют по ряду основных признаков:

1) *по назначению* – конструкционного, триботехнического, электротехнического, декоративно-защитного и специального назначения;

2) *по типу материала матрицы*:

а) металлические;

б) полимерные;

в) неорганические (неорганические полимеры, минералы, керамика, углерод);

г) полиматричные (гибридные);

3) по типу элементов армирующего наполнителя:

а) дисперсно-упрочненные;

б) волокнупрочненные;

4) по методу получения – формируемые в жидкой, твердой и газообразной фазе связующего (матрицы).

На рисунке 4.2 представлены принципиальные схемы армирования КМ дисперсными и волокнистыми наполнителями.

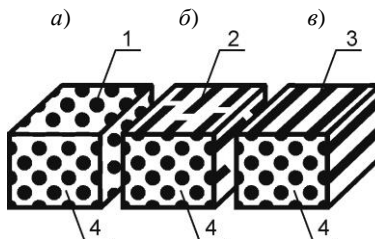


Рисунок 4.2 – Схема структуры дисперсно- (а) и волокнупрочненных (б), (в)

композитов:

1 – дисперсные частицы наполнителя;
2 – дискретные волокна; 3 – непрерывные
волокна; 4 – матрица

Некоторые композиты по удельным показателям прочности и жесткости, сопротивлению усталостному разрушению и другим свойствам превосходят традиционные конструкционные материалы (см. таблицы 4.1 и 4.9). Необходимые свойства закладываются на этапе проектирования с учетом характеристик основных и вспомогательных компонентов, а также прочности адгезионных связей между ними. Многообразии матриц и наполнителей, а также схем армирования дает возможность создавать изделия с комплексом заранее заданных свойств, которые наиболее полно отвечают условиям эксплуатации деталей и конструкций. При этом возможна реализация таких сочетаний свойств, которые недостижимы для традиционных конструкционных и роботехнических материалов.

Еще одним достоинством КМ является возможность на стадии изготовления придать полуфабрикату форму, максимально близкую к форме детали, конструкции или даже узла.

Очень важно, что в матрице на границе ее раздела с наполнителем располагаются переходные слои, которые имеют структуру, отличающуюся от структуры матрицы в объеме, и могут играть существенную роль в обеспечении свойств композитов.

Области применения композитов обусловлены основными свойствами исходных компонентов. В настоящее время композиты применяют в основном как конструкционные материалы. В том числе в авиации для высоконагруженных деталей самолетов (обшивки фюзеляжа, лонжеронов, нервюр, панелей, лопастей вертолетов и др.) и двигателей (лопаток компрессора, турбины и т. д.); в космической технике – для узлов силовых конструкций, элементов жесткости, панелей, теплоизоляционных защитных элементов, в автомобилестроении – для облегчения кузовов, рессор, рам, панелей кузовов, бамперов и др., в гражданском строительстве (пролеты мостов, элемен-

ты сборных конструкций высотных сооружений и т. д.) и в других областях народного хозяйства.

Композиты на основе металлических матриц имеют увеличенную (по сравнению с традиционными сплавами) удельную прочность и жесткость только за счет повышения физико-механических характеристик, поскольку плотность КМ и сплавов примерно одинакова.

В **дисперсно-упрочненных композитах** металлическая матрица является основным элементом, несущим нагрузку, а дисперсные частицы только тормозят движение в ней дислокаций и развитие пластической деформации (чем больше это сопротивление, тем выше прочность КМ). Высокая прочность достигается при размере частиц 10–500 нм (при среднем расстоянии между ними 100–500 нм) и их равномерном распределении в матрице. Наполнителями служат, как правило, дисперсные частицы тугоплавких фаз: оксидов, нитридов, боридов, карбидов (Al_2O_3 , SiO_2 , BN, SiC и др.). Дисперсно-упрочненные КМ получают в основном методами порошковой металлургии на основе большинства применяемых в технике металлов и сплавов.

Одним из основных условий обеспечения высокой прочности КМ на основе металлов является отсутствие диффузионного взаимодействия компонентов (матрицы и наполнителя) при изготовлении и эксплуатации изделий из КМ.

Наиболее широко используют сплавы на основе алюминия (типа САП) и никеля. Материалы САП представляют собой порошок Al, армированный частицами его оксида Al_2O_3 (от 6 % – в САП-1 до 22 % – в САП-4). С ростом наполнителя повышаются прочность, твердость и жаростойкость, но уменьшается пластичность. Из САП производят все виды полуфабрикатов (листы, профили, трубы, заготовки для штамповки, фольгу). Из них изготавливают детали, от которых требуется высокая удельная прочность и коррозионная стойкость (штоки поршней, лопатки компрессоров, лопасти вентиляторов и др.).

Спеченные алюминиевые сплавы (САС), содержащие до 30 % Si и до 7 % Ni, заменяют более тяжелые стали при изготовлении отдельных деталей и конструкций.

Большие перспективы у никелевых дисперсно-упрочненных материалов. Наиболее высокую прочность при высоких температурах имеют сплавы на основе никеля с 2–3 % двуоксида тория или двуоксида гафния. Матрицей этих сплавов являются обычно твердые растворы ($\text{Ni} + 20\% \text{Cr}$, $\text{Ni} + 15\% \text{Mo}$, $\text{Ni} + 20\% \text{Cr}$ и Mo). Широкое применение получили сплавы ВДУ-1 (никель, упрочненный двуокисью тория), ВДУ-2 (никель, упрочненный двуокисью гафния) и ВД-3 (матрица $\text{Ni} + 20\% \text{Cr}$, упрочненная окисью тория). Эти сплавы обладают высокой жаропрочностью.

В *волоконноупрочненных композитах* наполнителями являются волокна или нитевидные кристаллы чистых элементов и тугоплавких соединений (С, В, Al_2O_3 , SiC и др.), а также тонкая проволока из металлов и сплавов (высокопрочная сталь, Мо, W и др.). Для армирования используют дискретные ($l/d \approx 10 \dots 10^3$) и непрерывные ($l/d \approx \infty$) волокна.

Волокна в КМ уменьшают скорость распространения трещин, зарождающихся в матрице, и практически полностью исключают внезапное хрупкое разрушение. Особенностью КМ с одноосно-ориентированными волокнистыми наполнителями являются анизотропия механических свойств вдоль и поперек волокон и малая чувствительность к концентраторам напряжения. Чем больше объемное содержание волокон, тем выше прочность и жесткость вдоль оси армирования. Однако необходимо учитывать, что матрица может передавать напряжения волокнам только в том случае, когда существует прочная адгезионная связь на поверхности раздела армирующее волокно – матрица. Поэтому матрица должна полностью окружать все волокна, что достигается при ее содержании не менее 15–20 %.

Существенным недостатком композиционных материалов с одно- и двумерным армированием является низкое сопротивление межслойному сдвигу. Низкие значения прочности и жесткости КМ в направлении, перпендикулярном расположению волокон, обусловлены тем, что они определяются свойствами матрицы. Эту анизотропию свойств КМ следует учитывать при проектировании деталей и конструкций.

Объемное армирование дает КМ более широкие возможности по регулированию их прочностных и других эксплуатационных свойств.

Дискретные волокна располагаются в матрице хаотично. При увеличении отношения длины к диаметру волокна возрастает степень упрочнения.

Непрерывные волокна используют для создания КМ со слоистой структурой, в которой каждый слой армирован большим числом параллельных непрерывных волокон. В ряде случаев слоистую структуру получают, используя непрерывные волокна в виде ткани, которая по ширине и длине соответствует конечному материалу. Нередко волокна сплетают в трехмерной структуре.

Прочность волоконноупрочненных КМ определяется свойствами волокон, поскольку матрица в основном только перераспределяет напряжения между армирующими элементами. Поэтому прочность и модуль упругости волокон должны быть значительно больше, чем прочность и модуль упругости матрицы. Армирующие волокна воспринимают напряжения, возникающие в композите при нагружении, придавая ему прочность и жесткость в направлении ориентации волокон.

В таблице 4.9 приведены свойства некоторых волоконноупрочненных КМ.

Таблица 4.9 – Физико-механические свойства композитов на металлической матрице

Материал	σ_B , МПа	E , ГПа	$\sigma_B/(\rho g)$, км	$E/(\rho g) \cdot 10^{-3}$, км
Бор – алюминий (ВКА-1А)	1300	220	50	9
Бор – магний (ВКМ-1)	1300	220	59	10
Алюминий – углерод (ВКУ-1)	900	220	45	10
Алюминий – сталь (КАС-1А)	1700	110	37	3

Для формирования качественного соединения между матрицей и волокнами необходимо обеспечить чистоту поверхностей (без загрязнения, газовых и других включений). Высокая прочность связей между матрицей и волокнами достигается благодаря их взаимодействию и образованию тонкого (1–2 мкм) слоя интерметаллидных фаз.

КМ на основе металлической матрицы получают совмещением компонентов в жидкой матрице, т. е. в расплаве матрицы. Для этого используют следующие способы:

- а) пропитку наполнителей матричным расплавом;
- б) нанесение материала матрицы на волокна наполнителя плазменным напылением или электролитическим способом;
- в) введение тугоплавких дисперсных наполнителей в расплав матрицы.

Изделия из КМ на основе дисперсных частиц и дискретных волокон изготавливают обычно способами, которые используют в традиционной металлургии. Изделия из КМ на основе непрерывных волокон получают, как правило, методами порошковой металлургии.

Композиты на основе полимерных матриц отличаются широкими возможностями управления эксплуатационными свойствами деталей и конструкций из них благодаря многообразию полимеров и наполнителей, схем армирования и вариантов их составов. Об этом свидетельствуют значения диапазонов изменения характеристик КМ (таблица 4.10).

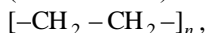
В композитах на основе полимерных матриц эффективно используется низкая плотность полимеров – от 0,9 до 2,2 г/см³. Сочетая их с высококомодульными и высокопрочными наполнителями, удается получить материалы с высокой удельной прочностью и набором уникальных эксплуатационных свойств.

Матрицу на стадии подготовки и изготовления материала называют *связующим*. **Связующее** означает полимерный состав, предназначенный для получения композитов, который содержит (в зависимости от свойств полимера как основного компонента) различные модифицирующие добавки технологического назначения, облегчающие процесс получения композита. К ним относятся пластификаторы, катализаторы, растворители, ускорители отверждения, антиоксиданты и другие добавки, которые обеспечивают жизнеспособность связующего, его вязкость, смачивающую способность и другие технологические характеристики.

Таблица 4.10 – Диапазоны изменения основных характеристик композитов на полимерной матрице

Характеристика	Размерность	Диапазон
Плотность	г/см ³	900–2200
Прочность при растяжении	МПа	1–10000
Модуль упругости при растяжении	ГПа	0,01–1000
Коэффициент Пуассона		0,15–0,5
Удельная ударная вязкость	кДж/м ²	2,5–500
Температура эксплуатации	°С	–270...+400
Коэффициент теплопроводности	Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	0,002–300
Коэффициент линейного термического расширения	К ⁻¹	–0,8...+1000
Удельное объемное электросопротивление	Ом·м	10 ⁻² –10 ¹⁹
Твердость	МПа	10–500

В полимерных композитах *матрицами* (или связующими) являются *синтетические полимеры*, т. е. вещества, макромолекулы которых состоят из многочисленных элементарных звеньев одинаковой структуры. Химическое строение полимера характеризуют его элементарным звеном, которое выражают структурной формулой полимера, учитывающей количество звеньев в цепи молекулы полимера. В частности, структурная формула самого распространенного полимера (полиэтилена) имеет вид



где n – число звеньев в цепи, называемое *степенью полимеризации*.

Соответственно, молекулярная масса полимера

$$M = nM_{\text{зв}},$$

где $M_{\text{зв}}$ – молекулярная масса звена.

Молекулярная масса влияет на агрегатное состояние (жидкое, твердое) и свойства материала. У твердых полимеров этот показатель составляет от $2 \cdot 10^3$ до 10^6 и более единиц.

В качестве примера влияния молекулярной массы на агрегатное состояние материала можно привести рассмотренный выше полиэтилен. Его мономером является газ этилен. В специальных условиях из пяти молекул этого газа образуется жидкость $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$, из 50–70 – вязкая жидкость, из 100–120 – твердое вещество (парафин) и, наконец, соединение 1500–2000 молекул этилена образует твердый материал – полиэтилен.

К органическим полимерам (самым распространенным связующим композиционных материалов) относят соединения, молекулы которых содержат атомы С, Н, О, N, S и ряда других элементов, входящих в состав главной цепи и боковых групп.

Органические полимеры целесообразно классифицировать по следующим признакам: по характеру строения макромолекул и по изменению свойств под действием температуры.

По характеру строения полимерных макромолекул различают органические полимеры линейного, разветвленного и сетчатого строения (рисунок 4.3).

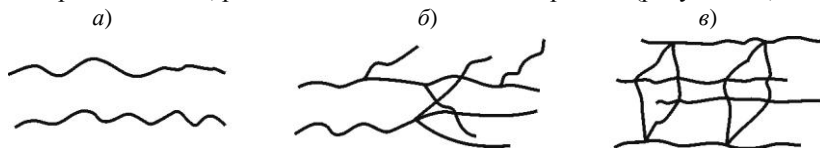


Рисунок 4.3 – Строение макромолекул полимеров:
а – линейных; б – разветвленных; в – сетчатых

Макромолекулы полимеров *линейного строения* состоят из длинных неразветвленных молекулярных цепей, в которых содержатся, как правило, одинаковые атомные группировки (см. рисунок 4.3, а). Атомы, входящие в главную цепь, связаны между собой прочными химическими (ковалентными) связями. Силы взаимодействия между макромолекулами, имеющие физическую природу (например, Ван-дер-Ваальса), на один-два порядка меньше. Наличие гибких макромолекул с прочными связями в их цепи и слабыми межмолекулярными связями обуславливает высокую деформационную способность линейных полимеров. Их свойства существенно зависят от плотности упаковки макромолекул, с увеличением которой повышаются и их прочностные характеристики.

В полимерах *разветвленного строения* (см. рисунок 4.3, б) длина боковых ответвлений макромолекулы может быть соизмерима с длиной ее основной цепи. Эти боковые ответвления обуславливают пониженное межмолекулярное взаимодействие, что увеличивает растворимость полимеров в химически активных средах.

У полимеров *сетчатого строения* (см. рисунок 4.3, в) цепи макромолекул объединены между собой прочными химическими связями и образуют сетчатую (пространственную или сшитую) структуру. В результате полимеры становятся неплавкими и нерастворимыми. В зависимости от густоты сетки физико-механические характеристики полимеров могут меняться в значительных пределах. Полимеры, имеющие густую сетку, обладают повышенными показателями теплостойкости, прочности и твердости, но низкой деформационной способностью.

Схемы, представленные на рисунке 4.3, имеют условный характер. Для наглядности макромолекулы, атомы которых связаны между собой прочными химическими связями, представлены в виде сплошных линий, а пустые промежутки между линиями – это слабые физические (ван-дер-ваальсовы) связи между соседними макромолекулами.

Макромолекулы полимеров образуют так называемую *надмолекулярную* структуру, которая формируется в процессе их укладки. Упорядоченность расположения макромолекул определяется в основном пространственным расположением и гибкостью цепи макромолекул и составляющих ее элементов. По степени упорядоченности структуры различают *аморфные* и

кристаллические полимеры. Аморфные полимеры, для которых характерен только ближний порядок расположения элементов структуры, имеют форму макромолекул в виде *глобул*, в которых они собраны в пачки или свернуты в клубки. Макромолекулы линейных и слабоветвленных полимеров формируются в кристаллические образования, имеющие дальний порядок расположения элементов структуры. Гибкие пачки макромолекул этих полимеров складываются в ленты, образуя *фибриллы*, в которых молекулярные цепи ориентированы в одном направлении. В свою очередь, фибриллы соединяются между собой, образуя пластины и *сферолиты*, размеры которых составляют десятки микрометров. Увеличение степени кристалличности полимеров способствует повышению их прочностных характеристик.

По изменению свойств под воздействием температуры различают термопластичные и терморезактивные (термоотверждаемые) полимеры.

Термопластичные полимеры (термопласты), имеющие линейное и разветвленное строение макромолекул, при нагревании выше температуры их плавления переходят в состояние расплава. Это свойство термопласты сохраняют при многократных нагревах.

В **терморезактивных полимерах (реактопластах)** при УФ-облучении или взаимодействии с введенными в их состав специальными веществами (сшивающими агентами) образуется сетчатая структура. Поэтому реактопласты становятся неплавкими, т. е. необратимо переходят в так называемое отвержденное состояние.

В таблице 4.11 представлены свойства наиболее распространенных термопластичных полимеров, макромолекулы которых имеют линейное и разветвленное состояние.

Для сравнения в таблице 4.12 представлены свойства распространенных реактопластов в отвержденном состоянии, т. е. имеющих сетчатую (сшитую) структуру макромолекул.

Анализ данных таблиц 4.11 и 4.12 показывает, что полимеры линейного и разветвленного строения (термопласты) имеют высокую деформационную способность и низкие прочностные характеристики по сравнению с полимерами сетчатого строения (реактопластами).

Таблица 4.11 – Физико-механические свойства термопластичных полимеров

Материал	ρ , г/см ³	σ_p , МПа	ϵ_p , %	НВ, МПа	$T_{пл}$, °С
Полиэтилен	0,95–0,96	20–30	300–800	45–60	125–135
Полипропилен	0,92–0,93	25–40	200–800	60–65	160–170
Поливинилхлорид	1,35–1,42	70–120	10–40	30–160	180–220
Политетрафторэтилен	2,15–2,25	15–35	250–500	30–40	327
Политрифторхлорэтилен	2,09–2,16	25–40	20–40	100–130	210–225
Полистирол	1,02–1,05	35–50	10–20	140–200	–
Полиамид	1,12–1,16	50–80	50–100	100–150	225–270
Поликарбонат	1,2	60–80	50–100	110–160	220–270

Примечание – ρ – плотность; σ_p – прочность при растяжении; ϵ_p – относительное удлинение при разрыве; НВ – твердость по Бринеллю; $T_{пл}$ – температура плавления.

Таблица 4.12 – Физико-механические свойства термореактивных полимеров

Полимерная матрица	ρ , г/см ³	σ_p , МПа	ϵ_p , %	E , ГПа
Эпоксидная	1,1–1,4	30–140	1,2–4,0	2,0–5,0
Фенолоформальдегидная	1,20–1,36	23–80	0,4–3,0	1,4–7,0
Полиимидная	1,20–1,45	90–95	1,0–4,0	3,2–5,5
Полиэфирная	1,10–1,46	24–70	0,5–6,0	1,5–4,5

Примечание – E – модуль упругости при растяжении.

Наибольшее распространение для деталей и конструкций мобильной техники имеют матрицы на основе термореактивных полимеров (эпоксидных, фенолоформальдегидных и полиимидных).

В качестве связующих термопласты и реактопласты на стадии формирования композитов находятся в вязкотекучем состоянии (в виде расплава или раствора), а при эксплуатации полимерные матрицы композитов находятся в твердом (кристаллическом или стеклообразном) состоянии.

Основное отличие полимеров от металлов состоит в особенностях их строения, обусловленных спецификой межатомных и межмолекулярных связей и отражающихся на свойствах.

Особенностью атомно-кристаллического строения металлов является кристаллическая решетка, состоящая из атомов, окруженных обобществленными электронами (электронным газом). Наличие слабо связанных с решеткой электронов обуславливает высокие показатели тепло- и электропроводности металлов, а также высокую химическую активность большинства металлов. Кроме того, наличие компактной кристаллической решетки определяет большую плотность металлов.

В полимерах атомы связаны между собой прочными химическими связями ковалентного и ионного типа, которые обуславливают высокий уровень электроизоляционных свойств, а также высокую химическую стойкость. Большая длина макромолекул определяет их низкую плотность (в 2–5 раз меньшую, чем металлов).

В качестве *наполнителей* композитов используют различные *дисперсные* и *волокнистые* материалы, выбор которых определяют назначение изделия (детали или конструкции), условия его эксплуатации, а также форма и габариты.

Столь широкий диапазон свойств КМ, представленный в таблице 4.10, связан как с характеристиками различных полимерных матриц, так и со свойствами разнообразных наполнителей.

В качестве *дисперсных* наполнителей применяют неорганические и органические вещества, частицы которых имеют размеры от нескольких нанометров до сотен микрометров. Природа материала наполнителя, размер и форма частиц, их фракционный состав влияют на технологические характеристики и эксплуатационные свойства композитов и деталей из них.

Дисперсные наполнители повышают размерную стабильность деталей, снижают технологическую усадку и увеличивают температуру переработки полимеров. Они придают полимерам специальные свойства: снижают (или увеличивают) коэффициент трения и повышают износостойкость, увеличивают теплопроводность, звукопоглощение и др.

Кроме того, некоторые дисперсные наполнители (отдельные металлы, их окислы и неорганические соединения) увеличивают в 1,2–1,5 раза физико-механические характеристики композитов на основе термопластов. Этот эффект обусловлен влиянием частиц этих наполнителей на структуру граничных слоев полимерной матрицы. Если количество частиц наполнителя в КМ достаточно велико, то большая часть полимерной матрицы переходит в состояние граничных слоев с повышенными показателями прочности и жесткости.

Дисперсноармированные композиты, имеющие относительно низкий уровень прочностных свойств, используют в основном для изготовления малонагруженных деталей и несилowych элементов конструкций машин.

В качестве волокнистых наполнителей используют углеродные, борные, стеклянные и органические волокна в виде нитей, жгутов, лент, тканей и нетканых материалов. В таблице 4.13 представлены физико-механические свойства основных видов волокон.

Существенно повышая физико-механические характеристики КМ, эти наполнители придают им также различные функциональные и эксплуатационные свойства. Содержание наполнителей изменяется в очень широких пределах: от 1–5 % – для низкоармированных материалов, до 96–100 % – для предельно армированных композитов. На рисунке 4.4 показано влияние концентрации стекловолокон на прочность при растяжении различных термопластов.

Таблица 4.13 – Свойства армирующих волокон

Волокно	Прочность при растяжении, МПа	E , ГПа
Полиэтиленовое (ПЭНД)	450–800	3,0–8,5
Полипропиленовое	300–700	3,3–10,0
Полиамидное	500–950	2,0–4,5
Сверхвысокомодульное (СВМ)	350–450	125,0–175,0
Кевлар 149	380–420	150,0–180,0
Углеродное	200–450	200,0–500,0
Стеклянное	200–490	50,0–95,0
Базальтовое	180–280	95,0–100,0

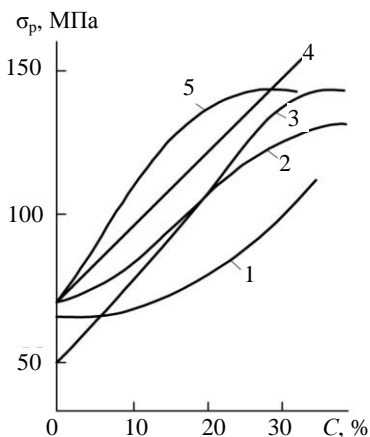


Рисунок 4.4 – Влияние содержания стекловолокна на прочность термопластов:

- 1 – полистирола; 2 – АБС-пластика;
- 3 – сополимера стирола и акрилонитрила;
- 4 – поликарбоната; 5 – полиамида 66

В таблице 4.14 приведены показатели свойств полимерных волокноармированных КМ на основе эпоксидных связующих, которые свидетельствуют об их высокой конкурентоспособности в сравнении с металлическими сплавами.

Для инженерных расчетов композитов на основе волокнистых наполнителей используют модель параллельного соединения компонентов, из которой следует, что разрушающее напряжение σ_k и модуль упругости при растяжении E_k композита можно оценить, используя соотношения

$$\sigma_k = c_n \sigma_n + c_m \sigma_m;$$

$$E_k = c_n E_n + c_m E_m,$$

где c_n, c_m – содержание наполнителя и полимера в композите ($c_n + c_m = 1$); σ_n, σ_m – прочностная характеристика волокнистого наполнителя и полимерной матрицы;

E_n, E_m – модуль упругости волокнистого наполнителя и полимерной матрицы.

Наиболее известными в машиностроении композитами на основе полимеров являются **углепластики** (композиты, армированные углеродными волокнами, толщина моноволокна составляет 6–8 мкм), **стеклопластики** (композиты, армированные стеклянными волокнами, при толщине моноволокна 10–12 мкм), **органопластики** (композиты, армированные органическими волокнами, при толщине моноволокна 8–10 мкм).

Схемы армирования оказывают значительное влияние как на свойства КМ, так и на их анизотропию, о чем свидетельствуют данные таблицы 4.13. На рисунке 4.5 представлены наиболее распространенные схемы армирования непрерывными волокнистыми наполнителями.

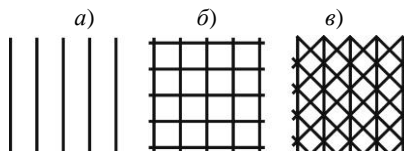


Рисунок 4.5 – Схемы армирования полимерной матрицы в слоистых КМ: а – однонаправленное (1:0; 0°); б – перекрестное (1:1; 0°, 90°); в – перекрестное (1:1; 0°, ±45°)

Таблица 4.14 – Свойства полимерных композитов

Материал	ρ , г/см ³	σ_p , ГПа	E , ГПа	Удельная прочность $\sigma_p/(\rho g)$, км	Удельный модуль упругости, $E/(\rho g) \cdot 10^{-3}$, км
Углепластики: однонаправленные (1:0)* перекрестные (2:1)	1,5 1,5	1,0–1,5 0,6–1,0	120–180 80–120	66–100 40–66	8,0–12,0 5,3–8,0
Стеклопластики: однонаправленные (1:0) перекрестные (2:1)	2,1 2,0	1,6–2,1 1,0–1,2	56–70 36–42	76–100 50–60	2,6–3,2 1,8–2,0
Органопластики: однонаправленные (1:0) перекрестные (2:1)	1,35 1,35	1,9–2,5 1,2–1,6	80–95 53–63	140–185 88–118	5,9–7,0 3,9–4,6
Боропластики: однонаправленные (1:0) перекрестные (2:1)	2,0 2,0	1,5 0,9	240 160	75 45	12 8

* (1:0) и (2:1) – соотношение волокон вдоль и поперек.

Области применения полимерных композитов достаточно обширны. Как уже отмечалось, они могут эффективно заменить традиционные конструкционные и триботехнические материалы в тех случаях, когда условия эксплуатации позволяют реализовать их достоинства. Помимо низкой плотности и высокой удельной прочности и жесткости, они обладают высокой демпфирующей способностью гасить механические и звуковые колебания (по этому показателю они на порядок превосходят металлы и сплавы), высокой износостойкостью в экстремальных условиях (в абразивно-агрессивных средах), низким коэффициентом трения в сочетании с эффектом самосмазывания (при нагрузках до 10 МПа и скоростях скольжения до 0,5 м/с), а также высокой химической стойкостью.

Как отмечалось, КМ формируют в твердой, жидкой и газообразной фазах связующего (матрицы).

Твердофазные компоненты соединяют в композиты с помощью энергоемких технологических процессов: высокотемпературным спеканием под давлением, взрывом и др.

Композиты из газовой фазы матрицы получают, как правило, путем нанесения матричных тонкослойных покрытий на элементы наполнителя (волокна, жгуты, ткани). Эти методы отличаются довольно большой энергоемкостью и низким показателем полезного использования полимера, поскольку перевод в газообразное состояние связан с большими потерями материала.

Наибольшее распространение имеют процессы получения композитов из жидкой фазы матрицы, когда расплавом термопласта или раствором реактопласта пропитывают армирующий наполнитель, а затем систему термообработывают и изготавливают изделия. Из всех перечисленных методов они обладают наименьшей энерго- и трудоемкостью.

Методы получения композитов из жидкой фазы связующего отличаются большим разнообразием. В зависимости от типа и структуры наполнителя, вида и свойств связующего применяют различные методы.

Термопласты перед совмещением с наполнителем находятся, как правило, в твердом состоянии (в виде порошка, волокон, гранул, пленок и др.). Затем их нагревают выше температуры плавления и совмещают с наполнителем с последующим изготовлением изделий. Изделия из термопластов, наполненных порошкообразными частицами или короткими волокнами, получают прямым и литьевым прессованием, литьем под давлением, экструзией и другими методами.

Литье под давлением является одним из методов получения несиловых изделий из термопластов. Оно включает следующие стадии:

- 1) подготовка исходных компонентов (термопласт в виде гранул, наполнитель в виде порошка с размером частиц до 200 мкм);
- 2) предварительное смешение компонентов;
- 3) пропускание компонентов через литьевую машину (полимер нагревается при температурах 120–350 °С в зависимости от температуры его плавления и расплавляется, затем расплав под давлением (8–25 МПа) заполняет полость пресс-формы, изготовленную под размер детали);
- 4) извлечение детали (зубчатого колеса, уплотнительного, установочного, направляющего кольца и др.) из пресс-формы после охлаждения.

На рисунке 4.6 представлена принципиальная схема изготовления деталей из термопластов литьем под давлением. Литье под давлением полностью автоматизировано, что обеспечивает высокую производительность технологического процесса.

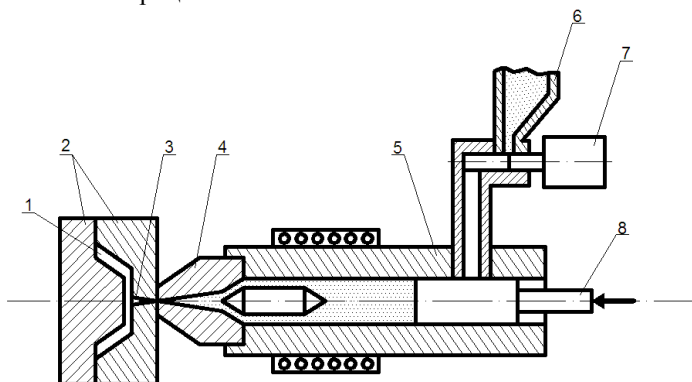


Рисунок 4.6 – Схема получения деталей

из термопластичных полимеров литьем под давлением:

- 1 – формирующая полость, повторяющая конфигурацию детали; 2 – литьевая форма;
- 3 – литниковый канал поступления расплава в полость; 4 – мундштук литьевой машины;
- 5 – обогреваемый цилиндр с расплавом термопласта; 6 – приемный бункер с исходным материалом в виде гранул; 7 – дозирующее устройство; 8 – поршень (плунжер)

Экструзия является наиболее эффективным методом формирования длинномерных фасонных изделий из термопластов (труб, шлангов, профилей, пленок). Ее отличие от литья под давлением состоит в том, что силовое воздействие на расплав полимера оказывает шнек, который обеспечивает более высокое давление при продавливании расплава через формирующую головку по сравнению с плунжером. Современные машины (так называемые термопласт-автоматы) оснащают шнеками.

Гранулы полимера (рисунок 4.7) после предварительной сушки загружают в бункер 1. Далее материал с помощью шнека 2, который вращается с частотой до 1000 об/мин, перемещается вдоль цилиндра 3 и разогревается до расплава за счет обогревающих цилиндров элементов, а также за счет трения о поверхность шнека и цилиндра. Для создания необходимого давления в зоне профилирующей головки 5 шнек имеет переменный шаг, который уменьшается по ходу перемещения материала. В ряде конструкций используют для этих целей переменное сечение шнека, уменьшающееся в направлении профилирующей головки 5.

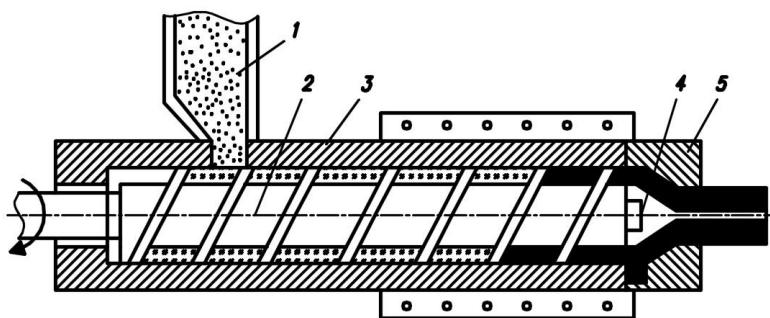


Рисунок 4.7 – Схема получения деталей из термопластичных полимеров экструзией:

1 – бункер с гранулами полимера; 2 – шнек; 3 – обогреваемый цилиндр; 4 – оправка с радиальными каналами; 5 – профилирующая головка

Реактопласты перед совмещением с наполнителем находятся в твердом или жидком состоянии. При изготовлении изделий из реактопластов, наполненных порошкообразными частицами или короткими волокнами, обязательной является стадия изготовления так называемых пресс-материалов (полуфабрикатов, обладающих необходимым набором компонентов нужной концентрации). Затем пресс-материалы перерабатывают в изделия различными видами прессования, а также литьем под давлением. Одним из наиболее эффективных методов изготовления несило-

вых деталей из реактопластов является *литьевое прессование*. На рисунке 4.8 представлена принципиальная схема этого метода. Он включает следующие операции:

- 1) подготовка исходных компонентов;
- 2) приготовление из них пресс-материала;
- 3) пропускание пресс-материала через литьевой агрегат (полимер расплавляется в нагреваемой камере, затем под давлением 15–20 МПа заполняет полость пресс-формы, повторяющей конфигурацию детали);
- 4) извлечение детали после охлаждения из пресс-формы.

Изготовление изделий из композитов, содержащих длинномерные и непрерывные (жгуты, нити, ленты, ткани) наполнители, осуществляется различными методами. Подавляющее большинство силовых конструкций изготавливают из реактопластов и непрерывных волокнистых наполнителей.

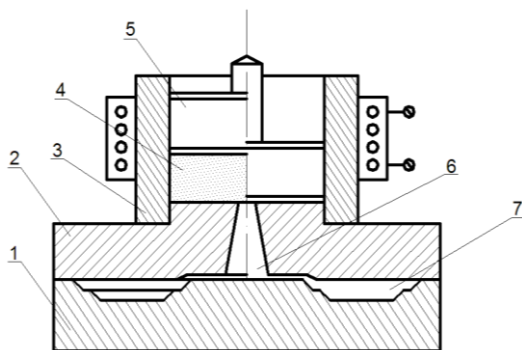


Рисунок 4.8 – Принципиальная схема получения деталей из термореактивных полимеров методом литьевого прессования:

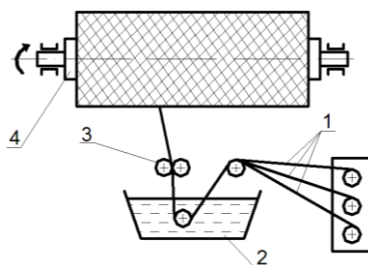
- 1, 2 – нижняя и верхняя половинки формы;
- 3 – отогреваемая камера;
- 4 – реактопласт;
- 5 – пуансон;
- 6 – литник;
- 7 – формирующая полость

Технологический процесс получения изделий в виде втулок включает следующие операции (принципиальная схема представлена на рисунке 4.9):

- 1) подготовку исходных компонентов (например, жгута из стекловолокон и раствора реактопласта (эпоксидного связующего) в органическом растворителе);
- 2) намотку на оправку (дорн), повторяющую форму изделия, жгута, который предварительно пропитывают раствором связующего, пропуская его через ванну с раствором;
- 3) размещение заготовки в автоклав и термообработку при давлении до 1 МПа и температуре, превышающей на 20–50 °С температуру отверждения связующего;
- 4) снятие изделия с оправки;
- 5) нарезание втулок необходимых размеров.

Рисунок 4.9 – Принципиальная схема изготовления трубчатых изделий намоткой стекложгута:

1 – стекложгут; 2 – пропиточная ванна с раствором полимера;
3 – отжимные ролики; 4 – оправка



Наиболее универсальным является технологический процесс получения изделий из композитов, который включает стадию изготовления препрегов, т. е. полуфабрикатов, содержащих слой наполнителя, пропитанный расплавом или раствором полимерного связующего. Таким образом можно изготавливать изделия любой конфигурации, включая крупногабаритные силовые элементы конструкций и триботехнические детали в виде тел вращения. Реализовать этот процесс можно различными путями.

На рисунке 4.10 представлена принципиальная схема метода получения композитов, получившая название «*порошковая технология*» (полимерное связующее в исходном состоянии представляет собой порошок). В качестве связующего используют порошки термопластичных и термореактивных полимеров.

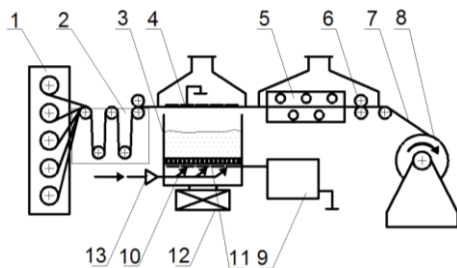


Рисунок 4.10 – Принципиальная схема получения препрегов углепластиков на основе порошкообразных полимерных связующих:

1 – стойка с рулонами жгутового наполнителя; 2 – блок роликкоопор; 3 – аппарат псевдооживления; 4 – электрод осадительный; 5 – камера термообработки; 6 – калибрующие валки; 7 – препрег; 8 – рулон готового препрега; 9 – источник высокого напряжения; 10 – решетка пористая; 11 – высоковольтный электрод; 12 – вибратор; 13 – система подачи сжатого воздуха

Этот метод включает следующие операции:

- 1) подготовку компонентов (полимера в порошкообразном состоянии с размером частиц не более 200 мкм и наполнителя в виде ленты или ткани);
- 2) нанесение частиц полимерного связующего на ленту наполнителя в камере аппарата псевдооживления;
- 3) термообработку препрега и его смотку в рулон;
- 4) выкладку необходимого количества слоев препрегов по форме детали;
- 5) прессование и термообработку системы для получения детали;

- 6) механическую обработку детали;
- 7) контроль качества детали.

Представленные методы получения КМ обладают значительно меньшей энергоемкостью и трудоемкостью по сравнению с процессами производства традиционных конструкционных материалов. Так, удельные энергозатраты на единицу массы при получении КМ на основе полимеров в 15 раз меньше, чем при производстве изделий из алюминия, и в 21 раз – из титана. При этом коэффициент использования полимерных композитов составляет 0,9–0,95, а металлов и сплавов – всего 0,5–0,6.

В 60–70-х годах XX столетия (на начальном этапе их развития) высокопрочные и высокомодульные волокноармированные КМ на основе полимеров применяли только в отраслях промышленности, которые определяли уровень развития материаловедения (авиа- и космическая техника, радио- и электронная техника, судостроение и атомная промышленность), а также в тех случаях, когда высокая стоимость (по тем временам) компонентов была оправдана большой ответственностью узлов и высокими требованиями к изделиям. В частности, уже тогда в авиационно-космической технике США композиционные материалы использовали в качестве средненагруженных и даже силовых элементов конструкций. Представляет интерес распределение различных материалов в конструкции самолета «Боинг 787»:

Материалы	Содержание, мас. %
Композиты	50
Al-сплавы	20
Ti-сплавы	15
Стали	10
Другие материалы	5

В ряде современных самолетов объем композитов доходит до 60–70 %. Их используют для изготовления фюзеляжей, хвостового оперения, рулей управления, законечников крыльев, горизонтальных стабилизаторов и других крупногабаритных деталей и конструкций. Для этих целей используют в основном стекло-, угле- и органопластики.

В настоящее время КМ используют в самых различных отраслях как материалы защитно-декоративного, декоративно-конструкционного, конструкционного и триботехнического назначения, поскольку по ценам они вполне конкурентоспособны с другими традиционными материалами.

Стеклопластики пока являются самыми распространенными композитами: их потребление достигает 10 млн тонн ежегодно. В качестве примера можно привести их использование в судостроении: практически все маломерные суда длиной до 20 м имеют корпуса из стеклопластиков на основе терморезактивных связующих.

Снижение стоимости изготовления волокнистых углеродных наполнителей в виде жгутов, лент, тканей и пр. расширило сферы их потребления. По сравнению со стеклопластиковыми углепластики имеют более высокие удельные показатели прочности и жесткости, а также очень низкий коэффициент

линейного термического расширения, что очень важно для элементов конструкционного назначения, эксплуатирующихся при значительных перепадах температур. Крупногабаритные панели летательных аппаратов имеют на 20–40 % меньшую массу и повышенную на 50 % жесткость и выносливость по сравнению со стеклопластиковыми. В целом это обеспечивает повышение топливной экономичности и снижение загрязнения окружающей среды.

В транспортном машиностроении применение композитов в грузовых автотранспортных средствах превышает тонну на единицу техники. В различных отраслях машиностроения из композитов производят корпусные изделия (кузова, кабины, двери, бамперы, панели, емкости для рабочих жидкостей и др.); элементы ходового оборудования (шасси, рессоры, фрикционные диски и тормозные накладки и др.); элементы привода, включая элементы трансмиссии и системы управления; материалы, защищающие поверхности рабочих органов, в частности облицовочные материалы элементов транспортирующих и землеройных машин, в том числе роторных экскаваторов (облицовка ковшей и элементов разгрузки).

Комплекс особых свойств композитов на основе полимеров позволяет использовать их для защиты рабочих органов и накопительных емкостей строительных машин и оборудования от налипания влажных и глинистых грунтов. Это явление существенно снижает производительность машин для земляных работ (экскаваторов, скреперов, погрузчиков) и автотранспортных средств (самосвалов), а также ухудшает пропускную способность транспортирующих машин. В качестве примера можно привести эксплуатацию экскаватора-драглайна: при работе с влажными грунтами слой налипшего материала достигает 15–30 % вместимости его ковша. Для того чтобы очистить ковш (как правило, вручную), требуется длительное время.

Футеровочные (облицовочные) пластины из КМ на основе полиолефинов (полиэтилена, полипропилена различной молекулярной массы) обладают гидрофобностью, низким коэффициентом трения, достаточно высоким уровнем износо- и ударостойкости, а также сохраняют свои свойства в диапазоне рабочих температур от –40 до +100 °С. Благодаря этим свойствам пластинами толщиной 4–8 мм облицовывают рабочие поверхности накопительных бункеров, осадительных циклонов, а также кузовов автотранспортных средств при погрузке и выгрузке абразивных сыпучих материалов повышенной влажности. Для более жестких эксплуатационных условий рекомендовано использовать футеровочные пластины толщиной 10–80 мм, что обеспечивает значительное повышение эффективности одно- и многоковшовых экскаваторов, погрузочно-разгрузочных устройств транспортирующих машин (приемных и накопительных бункеров, воронок, течек и др.), платформ железнодорожных думпкаров, а также кузовов большегрузных самосвалов – при перегрузке и транспортировке влажных материалов с кусками размером не более 700 мм (без скальных включений).

Так, применение пластин толщиной 50 мм на лотках вибропитателя бункера гравийной линии увеличивает ее пропускную способность в 2 раза, а также снижает максимальную нагрузку электродвигателя питателя в 2 раза (с 11 до 5,5 А). Футерование пластинами ковшей экскаватора-драглайна (вместимостью 10 м³) увеличивает производительность на 10 %, а срок службы ковша – в 2 раза.

Значительный эффект дает использование облицовочных пластин кузовов карьерных автосамосвалов БелАЗ. В условиях зимнего периода коэффициент использования их грузоподъемности составляет всего 0,74–0,88 при транспортировании горных пород с повышенным содержанием глинистых включений. Футерование кузова пластинами из КМ на основе полиэтилена высокой плотности приближает величину этого коэффициента к единице.

Существенное снижение материалоемкости достигается при использовании КМ для укрепления металлоконструкций, работающих на изгиб и сдвиг. Так, применение накладок из угле- и боропластиков для усиления элементов, работающих на изгиб (балок, лонжеронов, шпангоутов и др.), позволяет существенно снизить их массу при значительном увеличении жесткости. Кроме того, высокая демпфирующая способность КМ позволяет значительно уменьшить уровень вибрационных напряжений и избежать резонансных режимов металлических деталей, усиленных КМ.

Наиболее простым способом соединения металлических деталей и деталей из КМ является склеивание. В частности, клеевые соединения на основе эпоксидных смол обеспечивают сдвиговую прочность до 25 МПа соединений угле- и боропластиков с алюминиевыми и титановыми сплавами.

4.4 Ленточные антифрикционные материалы для тяжело нагруженных узлов трения

К отдельному классу следует отнести ленточные антифрикционные материалы (ЛАМ), которые могут работать в условиях сухого трения, используя эффект самосмазывания. Их основными элементами являются конструкционная основа (лента, ткань и др.), которая воспринимает основные нагрузки в нормальном к поверхности трения направлении, и антифрикционный компонент, обеспечивающий взаимодействие с сопрягаемыми деталями в узле трения. ЛАМ используют, как правило, в тяжело нагруженных узлах трения, в том числе в качестве подшипников скольжения, упорных колец, направляющих, сферических и других опор. Использование подшипников скольжения, не требующих смазки, позволяет во многих подшипниковых узлах машин и механизмов отказаться от сложных маслосистем, что снижает их материалоемкость и повышает надежность.

Эффект самосмазывания обеспечивается благодаря составу и свойствам антифрикционного компонента, который состоит, как правило, из политетрафторэтилена (ПТФЭ) и его наполнителей, играющих роль твердых смазок. Чаще всего в качестве твердых смазок используют дисульфид молибдена (MoS_2) и графит. Они уменьшают механическое взаимодействие между сопрягаемыми поверхностями материалов деталей. При этом они должны иметь низкую прочность на срез в направлении скольжения и высокую прочность на сжатие в направлении приложенной нагрузки. Сочетание ПТФЭ, имеющего низкий коэффициент трения, и твердых смазок, обеспечивающих высокую износостойкость элементов узла трения, дает результат. Такие материалы способны выдерживать очень большие нагрузки и работать без смазки в широком диапазоне температур (от -200 до $+300$ °С) в воздушной и вакуумной средах, в жидких средах, не обладающих смазочным действием. Они обладают высокой прочностью, низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью, хорошей прирабатываемостью и высокой теплопроводностью.

Различают слоистые, каркасные и комбинированные ЛАМ.

К **слоистым ЛАМ** относятся материалы, состоящие из тонких слоев различных по природе и структуре компонентов, в том числе в виде полосового проката и фольги, тканей и лент, покрытий, которые прочно связаны между собой. В качестве примера можно привести биметаллические сталебронзовые ленты; стальной полосовой прокат с покрытиями из металла или полимера, а также ткани из различных волокон (металлических, неметаллических, полимерных и др.), пропитанные антифрикционными композициями, которые обеспечивают необходимые эксплуатационные характеристики материалов.

К **каркасным ЛАМ** следует отнести материалы, у которых конструкционная основа представляет собой пористую трехмерную систему, сформированную из металла или керамики методами порошковой металлургии. В качестве пористого каркаса используют различные металлы и сплавы (в основном бронзу различного состава и стали), а также углеграфитовые материалы.

К **комбинированным ЛАМ** относятся материалы, которые содержат ленточную конструкционную основу и пористый каркас.

Наибольшее распространение имеют комбинированные ЛАМ, состоящие из стальной ленточной основы и пористого каркаса из бронзы, заполненного антифрикционным составом на основе ПТФЭ (фторопласта-4, тефлона), который является термопластичным полимером. Симметричное расположение атомов фтора в макромолекуле полимера $[-\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$ обеспечивает ему исключительно малый коэффициент трения без смазки ($f = 0,04 \dots 0,10$) при низких скоростях скольжения. Однако при повышенных скоростях он быстро изнашивается, поэтому в чистом виде в узлах трения его практически не используют, в том числе и в ЛАМ. На рисунке 4.11 приведена принципиальная схема металлофторопластового ленточного материала.

Технологический процесс изготовления комбинированного ЛАМ включает следующие стадии:

- 1) формирование на поверхности стальной ленты покрытия из меди (толщиной 0,1 мм);
- 2) нанесение на ленту слоя сферических частиц бронзы;
- 3) спекание пористого слоя и его припекание к основе;
- 4) заполнение пор слоя бронзы суспензией фторопласта-4 с порошковым наполнителем;
- 5) спекание фторопласта-4 с удалением растворителя;
- 6) калибрование готовой ленты;
- 7) нанесение на тыльную сторону стальной ленты электролитического антикоррозионного покрытия;
- 8) изготовление свертных втулок, упорных колец и полусферических опор штамповкой.

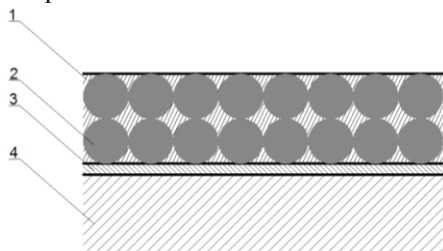


Рисунок 4.11 – Схема металлофторопластового ленточного материала:

- 1 – слой фторопласта-4 с наполнителями;
- 2 – частица бронзы; 3 – слой меди;
- 4 – стальная лента

На стальную ленту заданной ширины электролитическим методом наносят слой меди толщиной 0,05–0,10 мм, которая предназначена для облегчения припекания к стальной ленте бронзового порошка. Порошок бронзы должен иметь узкий гранулометрический состав (диаметр частиц в диапазоне 0,063–0,160 мм). Как правило, используют оловянную бронзу, которая обладает высокими противозадирными свойствами при трении по металлу.

Дозированный слой сферических частиц спекают в проходных конвейерных печах при толщине слоя 0,25–0,50 мм. При этом пористость слоя должна быть достаточно большой – в пределах 30–35 %.

Спекание осуществляют в восстановительной атмосфере при температурах, при которых еще не образуется жидкая фаза (до 780 °С), т. е. частицы бронзы именно припекаются друг к другу и к стальной основе.

Далее осуществляют пропитку образованного пористого слоя бронзы пастой на основе фторопласта-4 и спекание частиц полимера (при температурах 360–380 °С).

Рабочая поверхность пористого каркаса не допускает механической обработки резанием, фрезерованием и другими методами, поэтому к допускам на толщину ленты и к точности операций штамповки ленты предъявляются повышенные требования. Для изготовления лент применяют поточные автоматизированные линии.

Полученный таким образом ЛАМ используют, как отмечалось, для изготовления штамповкой свертных втулок, упорных колец, шаровых опор и др.

Использование ЛАМ на основе фторопласта-4 дает следующие преимущества:

- 1) работа без смазки с коэффициентом трения 0,08–0,12 (или с одноразовой смазкой);
- 2) сохранение эксплуатационных свойств в интервале от –200 до +280 °С;
- 3) сохранение работоспособности при попадании умеренного количества загрязнений;
- 4) допускается довольно большой износ (до 0,2 мм) при сохранении работоспособности;
- 5) высокие предельные нагрузки (в некоторых случаях до 500 МПа) при низких скоростях скольжения.

4.5 Наноматериалы и нанотехнологии

В развитых странах давно осознаны перспективы и ключевая роль, которую будут играть в недалеком будущем наноматериалы и нанотехнологии. Их относят к наиболее перспективным направлениям, которые могут стать основой фундаментальных преобразований науки и техники XXI века. Достаточно обратить внимание на широкомасштабную государственную поддержку этого научного направления. В частности, в США в начале века разработана долгосрочная национальная комплексная программа National Nanotechnology Initiative (Национальная нанотехнологическая инициатива), на которую уже выделено более 12 млрд долларов. Страны Евросоюза также вкладывают значительные средства в исследования и освоение наноматериалов и нанотехнологий. В соответствии с существующими прогнозами мировой объем производства в этой области через 10 лет превысит 1 трлн долларов.

В Беларуси создание и применение нанообъектов является одним из приоритетных направлений развития науки и техники. Это направление развивается в рамках *Государственной комплексной программы научных исследований «Наноматериалы и нанотехнологии»*.

Для машиностроения особую значимость имеют нанотехнологии создания деталей и конструкций машин. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

- уникальными свойствами материалов в наноструктурном состоянии;
- необходимостью изготовления деталей и конструкций машин с качественно и количественно новыми свойствами;
- целесообразностью кардинального снижения габаритов и материалоемкости деталей и конструкций машин.

К **наноструктурным** относят структурные элементы, размеры которых составляют 1–100 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$, «нано» – от греческого *nanos* – карлик).

Напомним, что наноструктурными являются следующие элементы:

- *наночастицы* – частицы, имеющие наноразмеры в трех направлениях;
- *нанотрубки, нановолокна* – объекты, имеющие наноразмеры в двух направлениях;
- *нанопленки*, – свободные пленки, имеющие наноразмер в одном направлении, т.е. наноразмерную толщину;
- *нанопокрyтия* – пленки, закрепленные на подложке и имеющие наноразмерную толщину;
- *наносуспензии* – взвеси твердых наночастиц в жидкости;
- *наноземлюлиии* – взвеси жидких нерастворимых наночастиц в жидкости.

Аномально высокий уровень свойств наночастиц обусловлен двумя основными причинами, связанными с **размерным фактором**: во-первых, соизмеримостью наночастиц с характеристическими параметрами, определяющими многие физические свойства твердых тел (длиной свободного пробега электронов, длиной волны упругих колебаний, размером магнитных доменов в ферромагнетиках и др.); во-вторых, увеличением концентрации активных поверхностных атомов с уменьшением размера частиц.

С учетом этого **наночастицей** считают комплекс атомов (до 100 нм), который рассматривается как часть объемного материала, но с размерами, соизмеримыми с упомянутыми характеристическими параметрами.

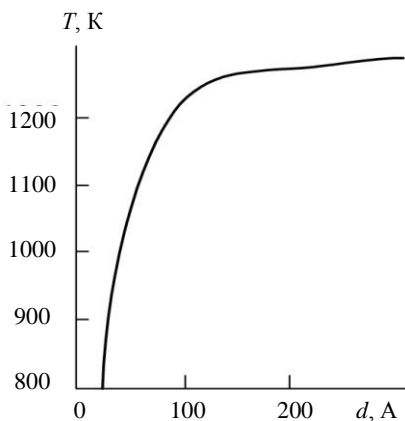


Рисунок 4.12 – Влияние диаметра наночастицы золота на температуру плавления

Подтверждением значительно го влияния размера наночастиц на свойства материалов может служить рисунок 4.12, на котором представлена зависимость температуры плавления золота от размера частиц. Видно, что изменение диаметра наночастиц в диапазоне от 300 до 50 нм способствует уменьшению температуры плавления более чем на 200 К.

Действительно, единичные наночастицы обладают набором уникальных прочностных, физических, химических и других свойств. Например, твердость наносфер (диаметром 20–50 нм) в четыре раза превосходит твердость

природного аналога (50 и 12 ГПа соответственно). Однако для реализации достоинств наночастиц в нанобъектах реальных габаритов необходима раз-

работка технологических процессов, учитывающих их особенности. Поэтому в развитых странах тематика научных исследований сместилась от изучения свойств наночастиц в область нанотехнологий.

Нанотехнологии – это технологические процессы создания материалов и технических систем, функциональные свойства и эксплуатационные характеристики которых определяются их наноструктурой, т.е. упомянутыми структурными элементами (размером от 1 до 100 нм).

В настоящее время для машиностроения имеется два перспективных технологических направления:

1) собственно *нанотехнологии формирования материалов (металлов и сплавов) из наночастиц*, основанные на их консолидации:

– компактных материалов, полученных методами порошковой металлургии (т. е. термическим припеканием под давлением);

– наноструктурных материалов, полученных термообработкой крупнозернистых и аморфных металлов и сплавов;

– слоистых материалов, полученных глубоким пластическим деформированием металлов и сплавов;

– тонкослойных наносистем в виде покрытий или пленок, сформированных методами молекулярного или ионного наплавления (конденсацией металлов из газовой или другой фазы);

2) *традиционные методы изготовления материалов с использованием наномодификаторов*:

– введением наноприсадок в топливо-смазочные материалы;

– осаждением или напылением покрытий с введением наноразмерных частиц на стадии подготовки;

– формированием композитов и сплавов, содержащих малые добавки наноразмерных модификаторов.

Нанотехнологии первого направления основаны на *консолидации наночастиц и их объединении в наноструктуры* при создании материала.

Технологии второго направления основаны на *отсутствии консолидации и равномерном распределении малых добавок наночастиц в объеме матричного материала*.

В этом состоит главное отличие нанотехнологий от традиционных технологий второго направления.

Первое технологическое направление является фундаментальным и формирует научные основы создания новых классов материалов и технических систем с уникальными свойствами. По существу нанотехнологии способны создавать структуры с заданными функциями и свойствами из отдельных групп атомов и молекул. Но для реализации достоинств наночастиц и создания из них материалов, которые по свойствам будут многократно превосходить известные материалы, необходим высокий технологический уровень разработок:

– тщательный отбор исходных материалов по составу и структуре;

– обеспечение высокой селективности наночастиц по размерам;

- защита поверхности наночастиц от примесей;
- выбор режимов формирования наноматериалов (давления прессования и способа его приложения, температуры и среды спекания, скорости охлаждения) с учетом свойств исходных нанопорошков.

Переход от дисперсного состояния наночастиц к компактному твердому телу (т.е. к компактным наноматериалам) с зёрнами нанометрового размера осуществляют различными методами, основанными на статическом и динамическом прессовании исходных заготовок.

Методы порошковой металлургии (спеканием в вакууме и защитных средах при *высоком статическом давлении* прессования) используют для получения наноматериалов непосредственно из крупнозернистых и аморфных материалов. В качестве примера получения наноструктуры в объеме крупнозернистых сплавов можно привести *статический* метод получения наноструктурированного сплава Cu-Fe. Смесь медного и железного порошков перемалывают в шаровой мельнице (в течение 15 ч), затем уплотняют под высоким давлением (1 ГПа) в течение суток, после чего спекают в течение 0,5 ч при температуре 400 °С под давлением 870 МПа. В результате получают образцы наноматериала, содержащего частицы размером от 20 до 70 нм, который имеет очень высокие показатели прочности (2800 МПа), что в 5 раз превышает предел прочности железа с обычным размером зёрен (от 50 до 150 мкм). Трудоемкая технология создания таких материалов с использованием энергонасыщенного специального оборудования позволяет пока получать образцы материала весьма небольших габаритов (15×5×0,3 мм). Тем не менее со временем можно ожидать изготовления силовых конструкций машин из наноструктурированных материалов, имеющих увеличенную долговечность.

Методы порошковой металлургии используют также при формировании наноструктурных керамических материалов, которые при сохранении высоких показателей твердости, прочности и износостойкости лишены главного недостатка традиционной керамики – хрупкости и низкой трещиностойкости. Для нанокерамики установлено значительное повышение пластичности и, соответственно, увеличение работоспособности деталей, сформированных из нанокерамических материалов различной природы (оксидов, нитридов, карбидов, боридов, силицидов и др.). Карбиды и нитриды ряда тугоплавких металлов (Mo, W, Ti, V и др.) и сплавов на их основе широко используют в качестве материалов для лезвийного и другого обрабатываемого инструмента, которые выпускают крупнотоннажными сериями.

Следует отметить низкую эффективность статического прессования нанопорошков из-за межчастичных адгезионных связей, препятствующих достижению высокой плотности прессовок.

Динамические методы сжатия (магнитно-импульсный, электроимпульсный, ультразвуковой и обработка сверхвысокочастотным излучением) позволяют существенно ускорить процесс получения компактных наноматери-

алов из крупнозернистых сплавов и достичь бóльшей плотности, чем в условиях статического прессования.

Методы, основанные на кристаллизации из аморфного состояния металлов и сплавов, также используют для получения наноструктурированных материалов. Для этого исходные металлы и сплавы закаляют за счет быстрого перехода из расплава в аморфное состояние, а затем создают нанокристаллическую структуру путем направленной кристаллизации различными методами. В их числе метод сверхбыстрого (со скоростью более 10^6 град/с) охлаждения расплава; метод газовой атомизации, который состоит в охлаждении расплава металла высокоскоростным потоком инертного газа; гальванический метод и др. К примеру, сверхбыстрое охлаждение позволяет получать сплав на основе Al с прочностью на разрыв, превышающей 1200 МПа. Гальванический метод обеспечивает формирование на электроде из Ti слоя Cu толщиной 2 мм со средним размером зерна 30 нм и пределом текучести около 120 МПа (для немодифицированной меди он не превышает 70 МПа).

Методы интенсивной (глубокой) пластической деформации используют для получения нанокристаллической структуры в пластичных сталях и других сплавах. В их числе кручение под гидростатическим давлением, равноканальное угловое прессование, прокатка и ковка. В результате в металлах или сплавах обычной крупнозернистой структуры формируются нанокристаллы. При этом наблюдается повышение плотности дислокаций, измельчение зерна, увеличение концентрации точечных дефектов и, как следствие, значительное (в 2–6 и более раз) увеличение прочностных характеристик при сохранении пластичности на высоком уровне. Степень повышения свойств зависит от состава компонентов, исходной структуры металла или сплава, механики деформирования. Например, в известной нержавеющей стали 12Х18Н10Т после равноканального углового прессования формируется нанокристаллическая структура с размером зерна до 100 нм, что обеспечивает предел текучести 1340 МПа, который почти в 6 раз превосходит эту характеристику стали, имеющей крупнозернистую структуру. При этом пластичность сохраняется на высоком уровне (деформационная способность составляет 6–27 %).

Глубокое пластическое деформирование используют также для создания уникальных слоистых наноматериалов (наноламинатных), состоящих из нанослоев различных материалов. Они могут содержать чередующиеся нанослои, например, «металл – металл», «металл – керамика», «металл – интерметалл», «керамика – керамика» и др. Для получения высокой прочности используют технологии глубокой пластической деформации в режиме сжатия или кручения при высоком давлении. Возможности этого вида нанотехнологий характеризует следующий пример: многослойный наноматериал, содержащий два мягких металла, после упомянутой обработки имеет прочность, достигающую нескольких ГПа. Например, обработка многократными циклами «горячее сжатие – холодный прокат – закаливание» многослойного материала Fe-Ag обеспечивает прочность наноматериала,

превосходящую прочность исходных компонентов на три порядка. Однако габариты исходного пакета, состоящего из 100 слоев, составляют всего 13×18 мм. Это позволяет использовать многослойные наноматериалы для изготовления износостойких покрытий реальной толщины, но на малых объектах. Размеры получаемых изделий ограничивают их применение в машиностроении микроэлектромеханическими устройствами в системах управления.

Тонкослойные наносистемы в виде покрытий или пленок толщиной не более нескольких микрометров существенно повышают износостойкость и коррозионную стойкость металлов и сплавов. Их получают осаждением материала на подложку из паров, плазмы или коллоидного раствора. Например, при осаждении из паров испаряемый материал нагревают в вакууме до температуры испарения, испаряют и конденсируют на обрабатываемой подложке. В результате формируется покрытие со средним размером кристаллитов 10–30 нм. Если испарение металла происходит в кислород- или азотсодержащей среде, то на подложке конденсируются пары соответствующих соединений (оксидов или нитридов). Поскольку формирование компактного слоя наночастиц происходит непосредственно на поверхности подложки, отпадает необходимость прессования. При этом размер нанокристаллов в покрытии регулируют изменением скорости испарения и температуры подложки.

Наносистемы, полученные по нанотехнологиям, пока не нашли широкого применения в мобильной технике. В основном их использование ограничивается исследовательскими работами или малыми сериями изделий (для испытаний или опытной эксплуатации). Это связано с высокой стоимостью наносистем этой группы, а также с повышенной трудоемкостью технологического процесса с учетом реальных габаритов деталей машин. В настоящее время изделия из таких наносистем используют преимущественно в микроэлектронной технике, в обрабатывающей отрасли, а также в других отраслях, не связанных напрямую с машиностроением.

Если придерживаться строгой терминологии, то **наноматериалами** следует считать материалы, целиком состоящие из наночастиц, т.е. консолидированные (компактные) материалы, сформированные по нанотехнологиям.

Второе технологическое направление имеет практическую направленность и относится к повышению эксплуатационных характеристик покрытий, композитов и сплавов, а также к восстановлению узлов трения при помощи известных технологических процессов за счет использования наноразмерных добавок. Введение небольшого количества (1–5 мас. %) наночастиц по свойствам эквивалентно введению в матрицу 20–40 мас. % традиционных армирующих наполнителей. Это отражается на массе изделий: детали из полимерных композитов, содержащих наночастицы, на 20 % легче, чем детали из высоконаполненных композитов, и на 80 % превосходят стальные детали.

Введение наноприсадок в топливо-смазочные материалы используют давно: суспензии наночастиц различных материалов (металлов и сплавов, оксидов, карбидов и боридов, керамики, комбинированных составов) вводят в моторные масла для восстановления изношенных элементов двигателей внутреннего сгорания.

Наночастицы, введенные в состав смазочных материалов, оказывают комплексное воздействие на узлы трения, увеличивая их долговечность за счет формирования разделительных слоев между трущимися поверхностями и упрочнения поверхностей трения, обеспечения стабильности реологических характеристик смазочного слоя в расширенном температурном интервале, а также уменьшения шероховатости. В качестве модифицирующих добавок используют наноразмерные частицы многих материалов. В их числе металлы (Al, Ni, Cu, Mo, W, Ti, Pb) и сплавы, оксиды металлов (Ti, Al, Cu, Zn, Mg), а также керамика (SiN, SiC, AlN), силикаты и углеродные нанотрубки (фуллерены). Известно несколько сотен наноструктурных ремонтно-восстановительных составов для продления ресурса работы агрегатов и узлов машины. При введении таких составов в смазочные материалы в процессе работы на поверхностях пар трения образуются износостойкие защитные слои (металлические, металлокерамические и др.) с размером зерен до 30 нм, которые значительно увеличивают послеремонтный ресурс агрегатов.

Нанопрimesи (например, на основе оксида циркония) добавляют в дизельное топливо, что позволяет на 4–5 % повысить КПД двигателя и снизить степень загрязнения выхлопных газов.

Традиционные методы осаждения и напыления используют для получения покрытий на основе известных материалов с добавлением наноразмерных частиц других модификаторов (металлов, сплавов, керамики и др.). Покрытия наносят электрохимическим и химическим осаждением, газозонным, ионно-лучевым, электро- и газотермическим (плазменным, высокоскоростным газопламенным – HVOF) напылением с введением наноразмерных частиц на стадии подготовки.

Довольно широкое распространение получило электрохимическое осаждение частиц металла и наноразмерного модификатора из электролита. В качестве матричного металла используют в основном Cr, Ni, Zn, Cu, Fe и их сплавы. В качестве модификатора вводят наноразмерные частицы алмаза, оксидов Si, Zr, Ti, Al, Zn, Mo, W и их смесей, карбиды, нитриды, бориды и др. Уровень повышения эксплуатационных свойств композиционных электролитических покрытий зависит от структуры матрицы, концентрации и свойств наноразмерных частиц. При введении модификатора существенно возрастает их микротвердость, во много раз увеличивается износ- и коррозионная стойкость, что связывают с изменением строения и формированием более мелкой кристаллической структуры матричного металла.

Методы напыления применяют для нанесения износостойких и защитных, свето- и радиопоглощающих покрытий. В частности, в машинах ис-

пользуют водоотталкивающие покрытия на основе наночастиц диоксида кремния. Наличие на поверхности пленки из наночастиц SiO_2 делает обработанную поверхность гидрофобной. Самоочищающиеся лакокрасочные покрытия содержат в верхнем слое керамические наночастицы, которые защищают кузова автотранспортных средств в три раза эффективнее обычных лаков. Нанесение на внешние поверхности фюзеляжа и крыльев летательных аппаратов керамических покрытий, в матрице которых хаотично распределены тонкодисперсные металлические частицы, делает летательные аппараты практически неуловимыми для радаров.

Технологии формирования композитов и сплавов, содержащих наноразмерные модификаторы, являются наиболее привлекательными (в экономическом и технологическом плане) для деталей и изделий конструкционного и триботехнического назначения. И хотя композиты и сплавы с наномодификаторами не обладают основными признаками консолидированных наноматериалов, тем не менее на постсоветском пространстве их относят к нанообъектам.

Повышение свойств матрицы (металла или полимера) достигается за счет введения малых количеств нанодисперсных модификаторов на стадии подготовки материала. Это обусловлено специфическим механизмом усиления свойств при введении малого количества наночастиц в объем сплава или композита. Например, в полимерных композитах наночастица является зародышем структурообразования, формируя в граничных слоях полимера структуру с повышенными показателями прочности и жесткости. Поэтому для обеспечения эффективного модифицирования необходимо создать условия (весьма трудоемкие), при которых наночастицы не будут группироваться в агломераты на стадии подготовки исходных компонентов, а равномерно распределяться в объеме матрицы.

Наноразмерные добавки используют также для повышения свойств деталей из порошковых композиций на основе Fe и его сплавов, Cu и ее сплавов, сплавов на основе Al, твердых сплавов и керамических материалов. В качестве модификаторов вводят наноразмерные частицы металлов, оксидов, карбидов и боридов, фуллерены и тубулены, а также ультрадисперсные кристаллы алмаза и нитрида бора. Для введения модифицирующих добавок используют различные методы, в их числе добавление наноразмерного порошка в состав исходной шихты, предварительное формирование наноструктурированного слоя на поверхности частиц спекаемого порошка и др.

Детали сложной конфигурации и структуры формируют из нанопорошков металлов (Al, Ti, Ni, Fe, Cu, Co и др.) и керамики методами 3D-формообразования путем послойного наращивания детали пучком лазерного излучения. На Западе эти методы получили название LENS technology (Laser Engineering Net Shaping – лазерное формообразование). Они различаются способом подачи порошка в зону лазерного воздействия, скоростью его охлаждения, наличием дополнительных источников нагрева и т.п. С помощью этих методов изготавливают детали сложной конфигурации,

которые по свойствам (по плотности, твердости, прочности и др.) практически не отличаются от подобных деталей, полученных традиционными способами. Между тем время формообразования составляет несколько часов, поэтому эти методы используют для единичного изготовления сложных по конфигурации и структуре деталей. В продукции машиностроения, за исключением авиационной и космической техники, они пока применяются довольно редко.

Введение нанокристаллических добавок в порошки способствует снижению энергоемкости процессов их спекания. Для многих сплавов (на основе Fe, Ni, Cu, Cr и других металлов) существенно (в несколько раз) сокращается время спекания, а также снижается температура формирования изделий. При этом повышаются физико-механические (ударная вязкость, твердость, прочность) и триботехнические (износостойкость, нагрузочная способность и др.) свойства изделий.

Эффект повышения прочностных и триботехнических свойств наблюдается и для керамических материалов. На рисунке 4.13 показаны триботехнические характеристики керамических материалов в условиях граничного трения при контакте со стальным контртелом. Видно, что модифицирование оксидокерамики углеродными наночастицами приводит к снижению коэффициента трения (до значений $f = 0,08...0,09$) во всем диапазоне нагрузок (вплоть до 30 МПа), а также к увеличению несущей способности примерно в 3,5 раза. Повышение прочностных и триботехнических характеристик покрытий обусловлено упрочняющим действием наночастиц, которые препятствуют развитию трещин и замедляют процесс разрушения покрытий.

В этой группе интенсивно развиваются исследования эксплуатационных свойств нанокомпозитов на основе полимеров, трудоемкость изготовления изделий из которых на порядок ниже, чем наноматериалов на основе металлов. Эти исследования имеют целью расширить области применения полимерных нанокомпозитов в технике за счет реализации основных достоинств наночастиц. В целом нанонаполнители позволяют улучшить ряд свойств полимерных материалов: физико-механические (прочность и жесткость), химическую стойкость и атмосферостойкость, термо- и теплостойкость, сопротивляемость горению, электропроводность и др.

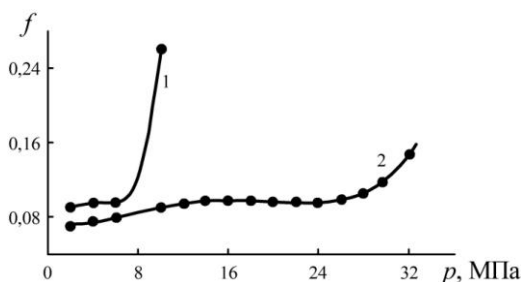


Рисунок 4.13 – Зависимость коэффициента трения немодифицированной (1) и модифицированной (2) керамики от давления в условиях граничной смазки

Наибольший интерес представляют полимер-силикатные, полимер-углеродные и металлосодержащие нанокомпозиты.

Полимер-силикатные нанокомпозиты представляют собой полимерные матрицы, в которые вводят слоистые глинистые минералы (например, гекторит, силоцит и др.). Частицы этих минералов имеют длину 50–300 нм (иногда до нескольких мкм) при толщине около 1 нм. Их введение в термопластические полимеры (полиолефины, фторопласты, полиамиды) повышает модуль упругости и прочность материалов. Полимер-силикатные нанокомпозиты используют в несилловых конструкциях машин (панели, вентиляционные решетки, детали систем кондиционирования), а также в приводах систем обеспечения (зубчатые ремни и т.п.).

Полимер-углеродные нанокомпозиты состоят из полимерных матриц и углеродных наносистем. В качестве углеродного наполнителя применяют фуллерены и тубулены, а также более дешевые углеродные наноматериалы. В их числе ультрадисперсные алмазные порошки с различным содержанием алмазо- и графитоподобной фаз (УДА, УДАГ и УДАВ – с содержанием алмазо- и графитоподобной фазы 95–98 и 3–5; 30 и 70; 70 и 30 % соответственно).

Некоторое представление о возможностях нанотехнологий дают рисунки 4.14 и 4.15. На рисунке 4.13 представлено влияние содержания углеродных наночастиц в полиолефинах (полиэтилене низкого и высокого давления полипропилене) на прочностные свойства композитов на их основе.

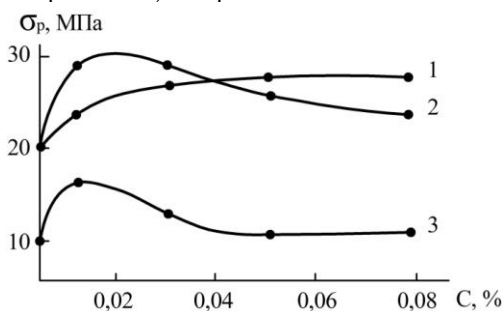


Рисунок 4.14 – Зависимость прочности при одноосном растяжении композитов на основе ПЭНД (1), ПП (2), ПЭВД (3) от содержания углеродных наночастиц

ражается в том, что практически вся полимерная матрица приобретает структуру граничных с частицами слоев, которая отличается более совершенным расположением макромолекул полимера.

Подтверждением модифицирующего действия малых количеств нанодобавок могут служить данные рисунка 4.15, на котором показано влияние содержания ультрадисперсных углеродных частиц на физико-механические свойства покрытий из полиамидов ПА6 и ПА11. Их используют для защиты шлицевых соединений карданных передач. Из рисунка следует, что наномо-

Как видно из рисунка, введение 0,01–0,02 % наночастиц увеличивает в 1,5–2,0 раза прочностные характеристики композитов с матрицей из ПП и ПЭВД. Способность нанонаполнителей существенно улучшить эксплуатационные свойства полимеров связана с очень большой удельной площадью поверхности наночастиц. Поэтому даже при небольшой концентрации влияние наночастиц выра-

модификатор повышает прочностные характеристики при сохранении достаточно высокой деформационной способности покрытий.

Фуллерены представляют собой сферические молекулы C_{60} или C_{70} . Тубулены – это трубчатые углеродные системы. Их называют нанотрубками. Тубулены имеют диаметр около 5 нм и состоят из большого количества (10–50) коаксиальных трубок. Их введение в полимеры существенно улучшает эксплуатационные свойства полимерной матрицы. Нанотрубки отличаются высокой механической прочностью: при плотности в 6–7 раз меньше плотности стальных волокон по удельной прочности они превосходят сталь на два порядка.

Эти свойства нанотрубок активно используют в отраслях машиностроения, где удельные показатели прочности и жесткости материалов играют важную роль. Например, при производстве авиационной техники все шире применяют нанокompозиты как конструкционные материалы, в частности элементы корпуса самолета F-35 изготавливают из нанокompозитов на основе эпоксидной смолы и нанотрубок, что позволяет заменить около ста других материалов, используемых ранее в конструкции корпуса самолета. Другой пример: интенсивность изнашивания такого материала, как политетрафторэтилен (фторопласт-4) снижается в 300 раз при введении нанотрубок.

Металлосодержащие нанокompозиты активно исследуют, анализируя возможности их использования в узлах трения машин и механизмов. В качестве модификаторов применяют различные металлы (Fe, Pd, Pt, Ni, Co, Au, Ag и др.), соли и оксиды металлов. Вполне очевидно, что введение наночастиц в композиты и сплавы дает положительный эффект, однако он несопоставимо меньше повышения прочностных и других свойств материалов, сформированных целиком из наночастиц.

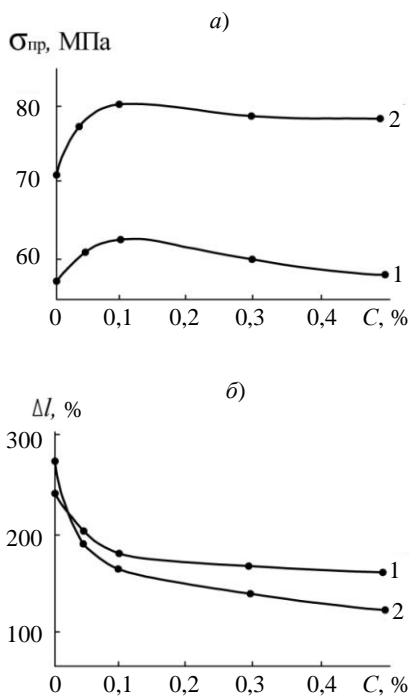


Рисунок 4.15 – Зависимость прочности (а) и относительного удлинения (б) при одноосном растяжении покрытий из композитов на основе ПА6 (2) и ПА11(1) от содержания наночастиц УДАГ

Анализируя современное состояние нанотехнологий и наносистем применительно к машиностроению, можно отметить следующее. В настоящее время материалы, полученные различными методами, используют в мобильной технике в разных масштабах.

Технологическое направление материаловедения, связанное с традиционными методами получения покрытий, а также деталей и конструкций из металлов и сплавов, модифицированных нанодобавками, развивается ускоренными темпами, что сулит многообещающие перспективы. В обозримом будущем будут производиться материалы с нанодобавками для массового потребления с расширенными функциональными возможностями, в том числе конструкционные материалы с повышенной удельной прочностью, а также триботехнические материалы, обладающие высокой износостойкостью и превосходящие современные материалы. При этом технологии станут более совершенными, что позволит значительно снизить количество не перерабатываемых (на данный момент) производственных отходов.

Технологическое направление формирования нанообъектов только из наночастиц пока находится на промежуточной стадии своего развития. Накопленные знания позволяют сделать переход на новый уровень – от наночастиц к компактным наноматериалам из частиц нанометрового размера. Последующий переход – от компактных к массивным материалам (т.е. к деталям и конструкциям реальных габаритов) – в полной мере еще не осуществлен. Пока происходит накопление результатов фундаментальных исследований, которые позволят установить закономерности создания и объединения наноструктур. При этом следует отметить, что в настоящее время методы формирования нанообъектов из наночастиц являются весьма энергозатратными и трудоемкими.

В далекой перспективе можно предположить возможность моделирования и конструирования структуры материала на атомарно-молекулярном уровне для получения необходимого набора функциональных свойств и эксплуатационных характеристик с учетом формы и конфигурации детали или конструкции, нагрузок и условий эксплуатации машины. Для реализации на практике (в продукции машиностроения) результатов фундаментальных исследований необходимы более совершенные и экономичные методы создания нанообъектов, высокотехнологическое и высокопроизводительное оборудование, надежные методы диагностирования наносистем на атомарном уровне.

4.6 Адаптивные материалы и конструкции

Термины «адаптивный» (от английского *to adapt* – приспособливаться) и особенно «интеллектуальный» стали очень популярными в различных областях: в материаловедении – адаптивные материалы и интеллектуальные

композиты, в конструкциях машин – интеллектуальные агрегаты и адаптерные системы для быстрой смены рабочего оборудования, в приводах машин – интеллектуальная гидравлика и интеллектуальная электроника, в технологии – интеллектуальное управление рабочим процессом, интеллектуальное уплотнение и т.п.

Адаптивными (адаптирующимися, «интеллектуальными», «умными») называют материалы, которые обладают способностью самопроизвольно приспосабливаться (адаптироваться) к воздействиям внешней среды.

Появление адаптивных материалов (АМ) стало возможным благодаря достижениям в области материаловедения полимерных композитов и металлических сплавов для авиационной и космической техники. По существу АМ – это своего рода устройства или узлы конструкций, обладающие способностью оценивать внешние воздействия и реагировать на них.

Различают три основных вида АМ:

1) *пассивные*, в которые вводят детекторы (в виде волокон, пленок и других элементов), изменяющие свои характеристики при внешних воздействиях;

2) *реактивные*, которые сами реагируют на внешние воздействия;

3) *интеллектуальные*, которые не только реагируют на внешние воздействия, но и сами обеспечивают устранение их последствий, т. е. самовосстанавливаются.

Материалы первой группы (*пассивные*) используют для диагностики конструкций, они работают на принципе встроенного самоконтроля состояния изделий из полимерного композита. Характерным признаком этих материалов является появление сигнала о возникших в материале изменениях при внешних воздействиях, его идентификация и анализ. Для этого в структуру композита вводят различного рода датчики. Наибольшее развитие получили волоконно-оптические датчики, которые идеально подходят к структуре и технологии получения полимерных волокнистых композитов. Они представляют собой кремниевые волокна, заключенные в защитную оболочку. Эти волокна вводят в композит на стадии его формования, а затем уже в готовом изделии через волокна пропускают световой сигнал и регистрируют изменения его оптических характеристик (амплитуды, фазы и др.) под влиянием изменений, происходящих в окружающем оптическое волокно материале. Любые деформации и напряжения в композите вызывают соответствующие колебания характеристик светового сигнала.

Эти системы находятся в стадии интенсивных исследований. Их используют для контроля состояния и диагностики повреждений в качестве встроенных средств контроля наряду с традиционными внешними методами неразрушающего контроля. В частности, разработаны конструкции крыльев самолета со встроенной системой волоконно-оптических датчиков для оценки влияния внешних воздействий на конструкции. Предполагается в

дальнейшем осуществлять мониторинг состояния основных конструкций авиакосмической техники в режиме реального времени с помощью бортовых компьютеров.

Оптические волокна, введенные в матрицу полимерного композита, могут служить элементами общей адаптивной системы. Они могут отслеживать при эксплуатации вибрации и деформации, разрушения и износ материала, которые должны компенсироваться изменением соответствующих характеристик интеллектуальных материалов.

Материалы второй группы (*реактивные*) представляют собой АМ, которые самопроизвольно реагируют на внешние механические, термические, физические и другие воздействия, изменяя собственные структуру и характеристики (геометрические, механические, физические и др.) или свойства сопряженных материалов.

Реактивные материалы и конструкции имеют различные типы реагирования на изменения окружающей среды. К самым простым системам можно отнести конструкции рабочих органов машин для земляных работ, которые изменяют свою структуру или форму при механических воздействиях. К ним относятся самозатачивающиеся зубья, ножи и режущие кромки элементов рабочего оборудования. Они имеют двухслойную конструкцию из разнородных материалов, отличающихся различной износостойкостью. При контакте с грунтом материал нижнего слоя изнашивается быстрее, чем материал верхнего слоя, тем самым обеспечивая достаточно острую кромку режущего элемента при эксплуатации. К этой же категории можно отнести отвалы и ковши с изменяемой формой. В зависимости от категории трудности разработки грунта они могут изменять свою форму благодаря демпферу (механическим или гидравлическим), обеспечивая оптимальную энергоёмкость процесса резания или копания грунта.

К более сложным системам второй группы относятся полимерные композиты и металлические сплавы, которые обладают «эффектом памяти» формы. Этот эффект заключается в восстановлении первоначальной формы пластически деформированного материала, которое происходит после его нагрева до определенной температуры. Из нужного материала изготавливают изделие заданной формы, затем его подвергают пластическому деформированию (как правило, для уменьшения габаритных размеров) и в таком виде устанавливают в необходимом месте. После этого его подвергают термообработке, в результате которой изделие приобретает первоначальные размеры и форму.

Если никелево-титановые сплавы, обладающие памятью формы, уменьшаются в размерах всего на 10 %, то полимерные композиты могут обеспечить четырехкратное уменьшение габаритов. Эти композиты с успехом используют для защиты механических и электрических элементов узлов от изнашивания и коррозии. Например, их широко применяют для герметиза-

ции стыков трубопроводов различного назначения, изготавливая муфты из полимерного композита с памятью формы. Другой пример: сплавы на основе титана (с «эффектом памяти») используют в антеннах космических аппаратов, которые раскрываются под действием тепла солнечных лучей.

К этой же группе относят композиты, армированные волокнами или пленками из материалов с «эффектом памяти», используемые для оценки температурных напряжений и деформаций, которым подвергаются элементы аэрокосмических систем.

Как правило, сплавы, обладающие памятью формы, целесообразно использовать в таких областях техники, где другие материалы применить невозможно. Как отмечалось, их используют в космической технике для изготовления самораскрывающихся антенн, предварительно получивших компактную форму, для облегчения доставки на космический аппарат; при установке саморасклепывающихся заклепок в труднодоступных местах конструкции машин; для самосрабатывающих соединительных муфт трубопроводов, а также в качестве материалов различных клапанов и рычагов, которые многократно изменяют свою форму при нагреве и охлаждении.

Группу реактивных материалов дополняют материалы, изменяющие свои физические характеристики при внешнем воздействии. Имеется ряд материалов, которые при механических воздействиях генерируют различные поля: акустические, электрические, магнитные. Это явление, известное как эмиссия, используют для оценки дефектности структуры и прочностных свойств материалов. Регистрируя характеристики сигналов этих полей, можно определить предельные нагрузки и ресурс работы изделий из анализируемых материалов в условиях статических и динамических нагрузок.

Различают физически и химически активируемые материалы. К физически активируемым относятся следующие материалы:

- электрически активируемые (пьезоэлектрические);
- магнитно-активируемые (магнитореологические жидкости и магнито-стрикционные вещества).

Из *электрически активируемых* (пьезоэлектрических) материалов наиболее распространены поликристаллические керамические и полимерные материалы. Напомним, что пьезоэлектрическим эффектом называют способность некоторых материалов создавать электрическое поле в ответ на прилагаемое механическое усилие. Пьезоэлектрические материалы используют в датчиках различных физических величин (сил, давлений, ускорений, ударов), а также в ультразвуковых, сейсмических и других датчиках.

К *магнитно-активируемым* материалам относятся магнитореологические жидкости. Их вязкость резко увеличивается при наложении магнитного поля и мгновенно (в течение 6,5 мс) возвращается в исходное состояние после снятия поля. Типичная магнитореологическая жидкость представляет собой суспензию микрочастиц (размером 3–8 мкм) ферромагнетиков

в жидкости (минеральном или синтетическом масле, воде и др.). Такие жидкости находят все более широкое применение в различных демпфирующих системах и устройствах, например, в системах амортизации тяжелых машин, в регулируемых амортизаторах автотранспортных средств и др.

К магнитно-активируемым материалам также относятся *магнитоотрицательные* вещества, т.е. материалы, способные изменять свою форму при наложении магнитного поля. Эту способность используют в различных датчиках (деформации, положения, движения, силы, давления).

Весьма солидные перспективы имеют химически активируемые материалы. Одним из направлений их использования является химическая активация полимеров при контакте с жидкостями, вызывающими их контролируемое набухание. В частности, этот эффект был использован в самозатягивающихся топливных баках, которые изготавливают из двух слоев резины: наружный – из вулканизированной резины, а внутренний – из невулканизированной, набухающей при контакте с нефтепродуктами. При этом внутренний слой покрывают топливонепроницаемой пленкой. При нарушении герметичности бака топливо контактирует с невулканизированной резиной, которая набухает и изолирует дефект.

По существу из сложных систем второй группы до состояния технологических разработок, опубликованных в открытой печати, доведены только материалы, имеющие память формы.

Третья группа *интеллектуальных материалов* также находится в стадии экспериментальных исследований и испытаний. К ним относятся системы, которые обладают способностью не только производить самодиагностику, но и осуществлять самовосстановление. В частности, имеются сведения о разработке конструкционных материалов на основе полимерных композитов, которые, диагностируя наличие повреждений (например, микротрещин) одним из упомянутых ранее методов, реализуют механизм самовосстановления путем перераспределения материалов. Для залечивания микротрещин пытаются использовать нанотехнологии, при этом комплексы наночастиц должны обладать достаточной подвижностью, чтобы устранить дефекты структуры.

Одним из примеров могут служить «самозалечивающиеся» полимеры, в объеме которых равномерно распределены микроконтейнеры (микрокапсулы или полые микроволокна) с «залечивающим» веществом. Как правило, в микроконтейнеры вводят неотвержденный полимер (олигомер). При нарушении сплошности или другом повреждении основного материала микроконтейнеры разрушаются и высвобождают залечивающий олигомер, который проникает в зону повреждения и полимеризуется, устраняя повреждение.

Можно предположить, что в недалекой перспективе материалы этой группы будут отслеживать в процессе эксплуатации деформации, вибрации, износ и другие негативные явления, происходящие с элементами конструк-

ции, агрегатами и узлами машины. И, не доводя конструкцию до разрушения (т. е. до образования трещин и других макродефектов), компенсировать влияние окружающей среды заданным изменением соответствующих характеристик (строения, структуры, свойств) интеллектуального материала.

В будущем адаптивные материалы могут стать основными функциональными материалами для ответственных узлов и конструкций машиностроительной продукции. Их способность «чувствовать» собственное состояние и влияние внешнего воздействия, направленно реагировать на него изменением структуры и свойств позволяет надеяться на кардинальное решение проблемы надежности машин в целом.

Помимо адаптивных материалов, в различных отраслях техники интенсивно развивается ресурсосберегающее направление, связанное с адаптивными техническими системами, обеспечивающими оптимизацию режимов эксплуатации технических объектов (в том числе машин) за счет гибкого автоматизированного управления параметрами технологического процесса с обратной связью.

Такие самонастраивающиеся устройства (*интеллектуальные агрегаты*) способны анализировать по заданным критериям не только состояние материалов, но и качество своей работы с коррекцией режимов ее выполнения. Благодаря наличию комплексной автоматизированной системы управления, контроля и регулирования такие агрегаты обладают способностью перестраивать режимы своего воздействия на окружающую среду (или обрабатываемый материал) на основе получаемой в реальном времени информации об эффективности этого воздействия. Соответственно, электронная система управления интеллектуального агрегата должна обеспечить:

- контроль состояния среды;
- управление воздействием рабочих органов на среду в зависимости от ее состояния;
- управление параметрами силовой установки в зависимости от нагрузки;
- контроль состояния самого агрегата, включая самодиагностику его узлов и агрегатов.

Подсистема контроля состояния среды базируется на информации оперативного контроля состояния среды, получаемой от соответствующих датчиков машины.

В *подсистеме адаптивного управления параметрами* машины основную роль играют алгоритмы управления параметрами рабочих органов на основе заложенных в программу математической модели и информации от упомянутых датчиков обратной связи.

Подсистема адаптивного управления двигателем обеспечивает минимизацию расхода топлива и снижение вредных выбросов продуктов сгорания, а также автоматически изменяет значения мощности двигателя и ско-

рости в зависимости от внешней нагрузки для достижения оптимальной эффективности и экономичности.

Подсистема контроля состояния самой машины, ее агрегатов и узлов повышает их надежность (в том числе ремонтпригодность) за счет применения встроенных диагностических устройств с выводом данных о месте и характере неисправности на приборную панель или дисплей бортового компьютера.

Таким образом, комплексная адаптивная система обеспечивает расширение функциональных возможностей машин и высокое качество работ при заданной производительности, снижение энергоемкости и повышение экономичности, увеличение производительности за счет повышения точности рабочих операций. Кроме того, она способствует удовлетворению требований международных стандартов *ISO 14000* «Система экологического управления», которые регламентируют условия экологической безопасности машин.

Значительный вклад в повышение эффективности эксплуатации вносят методы управления машиной с применением *глобальной системы навигации GPS (Global Positioning System)*.

Следует обратить особое внимание на проблему безопасности, поскольку в системе «оператор – машина» довольно часто слабым звеном является человеческий фактор. Интеллектуальный агрегат, оснащенный комплексной автоматизированной системой управления, позволяет минимизировать влияние этого фактора и снизить риски, связанные с ним. Производители одноковшовых экскаваторов еще в прошлом веке начали использовать такие системы управления, поскольку при наличии различных рабочих режимов функционирования силовой установки оператор выбирает, как правило, режим с наибольшей мощностью независимо от условий эксплуатации. Поэтому многие компании («Caterpillar», «Volvo» и др.) отказались от ручного управления, убрав с панели управления выключатели режима работы и мощности двигателя. Таким образом, не оператор выбирает режим работы, а адаптивная бортовая система управления. При копании она управляет рабочими органами и механизмом поворота платформы, выбирая наиболее экономичный режим эксплуатации.

В плане применения интеллектуальных систем управления наиболее показательным примером является вибрационная техника последнего поколения для уплотнения грунтов и дорожно-строительных материалов. Законодатели высокотехнологичных разработок в области дорожной техники (компании «Ammann», «Bomag», «Caterpillar», «Dynapac», «Hamm», «Sakai» и др.) выпускают вибрационные дорожные катки с системой *IC* (от английского *Intellectual Compaction* – интеллектуальное уплотнение) для земляного полотна, щебеночного покрытия и асфальтобетонной смеси. Их стоимость на 20–30 % выше стоимости обычных катков, однако они имеют ряд значительных достоинств.

Система *ИС* вибрационного катка включает описанные ранее четыре подсистемы и обеспечивает непрерывные измерение и регистрацию жесткости уплотняемого материала, автоматически корректируя процесс уплотнения в режиме реального времени на основе этих измерений. На большинстве катков для измерения положения вибровальца относительно рамы катка используют датчики усилий и перемещений. При этом жесткость уплотняемого материала оценивают по силе реакции вибровальца. Именно этот показатель (величина реакции вибровальца) используют в программном обеспечении бортового компьютера катка для регулирования давления вибровальца на уплотняемый материал.

Поскольку энергия уплотнения корректируется по результатам измерений жесткости, процесс уплотнения ускоряется, что сопровождается снижением числа проходов катка. При уплотнении изменяется несущая способность обрабатываемого материала: на начальной стадии она невелика, а затем по мере уплотнения возрастает. Соответственно, растет давление, которое оказывает вибровалец на материал. Управление этим процессом осуществляют за счет регулирования как статической, так и динамической составляющих давления катка, передаваемого вибровальцем обрабатываемому материалу.

Регулирование статической составляющей давления вибровальца катка осуществляют изменением силы тяжести, приходящейся на него, а также формы и площади контакта вальца с уплотняемой поверхностью.

Регулирование динамической составляющей давления катка достигается управлением вынуждающей силой вибровозбудителя, частотой и характером колебаний, а также изменением вектора направленных колебаний.

Система *ИС* позволяет исключить ошибки, связанные с неправильным выбором режимов работы катка и нарушением технологии уплотнения, а также сократить технологические перерывы для контроля плотности уплотняемого материала и исключить повторные и рекламационные работы.

К основным достоинствам катков с системой *ИС* относятся: во-первых, увеличение производительности за счет уменьшения числа проходов, что сопровождается сокращением времени обработки и экономией топлива; во-вторых, повышение качества уплотнения за счет рационального управления технологическим процессом; в-третьих, повышение надежности машины за счет системы контроля параметров агрегатов катка; в-четвертых, увеличение долговечности дорожных покрытий за счет повышения однородности уплотняемого материала.

Таким образом, система электронного управления всеми узлами и агрегатами обеспечивает способность машины гибко регулировать параметры своего функционирования и воздействия при изменении внешних условий, чтобы получить высокие показатели качества, производительности, ресурсосбережения и экологической безопасности.

Контрольные вопросы к разделу 4

- 1 Что такое удельная прочность и удельная жесткость материала?
- 2 Классифицируйте конструкционные стали по основным признакам и назовите области их применения.
- 3 Какие стали используют для изготовления слабо-, средне- и тяжело нагруженных деталей машин?
- 4 Почему в отожженном состоянии легированные стали по прочностным свойствам мало отличаются от углеродистых сталей?
- 5 Какие сплавы используют для базовых и съемных элементов рабочих органов машин для земляных работ?
- 6 Классифицируйте наплавочные материалы по химическому составу и назовите области их наиболее эффективного применения.
- 7 Назовите основные различия строения металлов и полимеров, которые отражаются на их свойствах.
- 8 Что такое степень полимеризации и как она влияет на свойства полимеров?
- 9 В чем состоят различия способов получения деталей из термопластов литьем под давлением и экструзией?
- 10 Как определить прочность и жесткость волокноармированных композитов?
- 11 Классифицируйте нанотехнологии.
- 12 Чем обусловлен аномально высокий уровень свойств наночастиц?
- 13 За счет чего повышаются прочностные и триботехнические свойства композитов и сплавов при введении нанодобавок?
- 14 Чем отличаются нанотехнологии получения консолидированных материалов от методов получения композитов и сплавов с нанодобавками?
- 15 В чем состоят различия пассивных, реактивных и «интеллектуальных» адаптивных материалов?
- 16 Что такое «эффект памяти»?
- 17 Назовите возможные области применения «интеллектуальных» материалов и конструкций в продукции машиностроения.

5

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ

5.1 Основные направления повышения работоспособности

На этапе изготовления надежность и работоспособность, заложенные при проектировании и конструировании машин, реализуют при помощи различных организационных мероприятий и технологических методов. Отметим, что на этом этапе также работает ресурсосберегающий принцип снижения трудоемкости и минимизации себестоимости выполнения работ. Поэтому при выборе технологического процесса необходим технико-экономический анализ различных вариантов.

К *организационным мероприятиям* относятся:

- 1) выбор необходимого станочного оборудования и приспособлений, режущего и измерительного инструмента;
- 2) применение типовых технологических процессов;
- 3) выбор рациональной технологии изготовления типовых деталей;
- 4) расширение специализации производства.

К *технологическим методам* относятся:

- 1) методы обеспечения требуемой точности размеров и качества поверхностей деталей при их механической обработке;
- 2) термическая, химико-термическая и термомеханическая обработка деталей;
- 3) нанесение покрытий;
- 4) методы обеспечения требуемого качества сборки узлов и агрегатов.

5.2 Технологическая рациональность конструктивных решений

При создании машины необходимо учитывать взаимосвязь и взаимовлияние конструкции, материалов и технологий. Важную роль в обеспечении их баланса играет технологичность конструкции.

Качественные и количественные показатели технологичности стандартизованы еще в бытность СССР (ГОСТ 14.205–83), тем не менее они, как и многие другие нормативные документы, не теряют своей актуальности и

поныне. Более того, технологичность является одним из важных показателей качества машины и неотъемлемой частью мероприятий по ресурсосбережению.

Технологичность конструкции машины – это совокупность свойств конструкции машины, обеспечивающая достижение заданных показателей качества при оптимальных затратах на ее производство, эксплуатацию, ремонт и утилизацию. Различают производственную, эксплуатационную и ремонтную технологичность конструкции (рисунок 5.1).

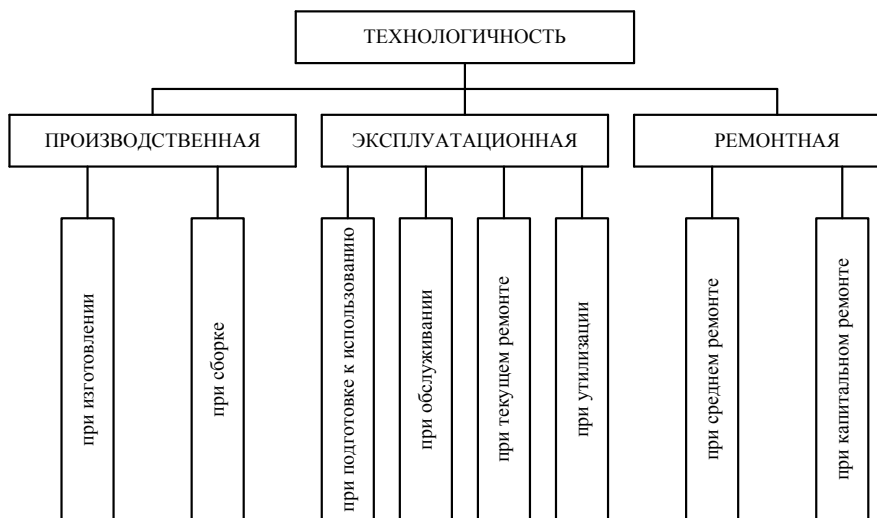


Рисунок 5.1 – Виды технологичности конструкции машины

Производственной технологичностью конструкции машины считают свойство конструкции, позволяющее изготовить и собрать машину с наименьшими затратами труда и материалов при обеспечении заданного качества. Ее связывают с сокращением времени и средств на конструкторскую и технологическую подготовку производства, а также на изготовление, контроль и испытания машины.

Обработка конструкции на производственную технологичность должна обеспечивать снижение трудоемкости и себестоимости изготовления машины за счет повышения серийности посредством унификации и группирования деталей по конструктивно-технологическим признакам; ограничения номенклатуры конструкций и применяемых материалов, преимущества конструктивных решений; снижения материалоемкости и применения высокопроизводительных типовых технологических процессов.

Эксплуатационной технологичностью конструкции машины является свойство конструкции, обеспечивающее наиболее длительное сохранение функциональных и эксплуатационных характеристик машины. Ее свя-

зывают с сокращением времени и средств на техническое обслуживание, текущий ремонт и утилизацию машины по окончании срока ее эксплуатации.

Ремонтная технологичность конструкции машины – это свойство конструкции, позволяющее ремонтировать машину с наименьшими затратами труда и материалов. Ее связывают с сокращением времени и средств на все виды ремонта, кроме текущего, т. е. плано-предупредительного.

Целесообразно выделить эксплуатационную технологичность при утилизации (или утилизационную технологичность), которая приобрела определяющее значение в концепции полного жизненного цикла машин. Утилизационная технологичность – это свойство конструкции, позволяющее производить утилизацию машины и рециклинг материалов с наименьшими трудозатратами. Она включает комплекс мероприятий, упрощающих и ускоряющих разборку машины на составные части, дефектацию и селекцию по пригодности деталей и материалов для последующего использования.

Как следует из приведенных определений, критерием технологичности конструкции является ее экономическая целесообразность при заданном уровне качества и конкретных условиях изготовления, эксплуатации, ремонта и утилизации.

В процессе технологической подготовки производства конструкцию машины отрабатывают на технологичность деталей, сборочных единиц и машины в целом. Технологический процесс изготовления детали выбирают в соответствии с конструкторским решением, которое в свою очередь учитывает возможности технологии.

Важную роль в обеспечении технологичности играет **единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП)**, которая предусматривает широкое применение ресурсосберегающих технологических процессов, техоснастки и оборудования, эффективных инженерно-технических и управленческих методов, средств механизации и автоматизации производственных процессов. ЕСТПП обязывает отрабатывать новую конструкцию машины на технологичность на всех этапах ее создания, в том числе на всех стадиях разработки конструкторской документации.

На *этапе разработки технического предложения* анализируют варианты принципиальных схем и компоновок машины с учетом технологичности конструктивных решений.

На *этапе эскизного проекта* выбирают оптимальный вариант принципиальной схемы базовой конструкции, которая должна лежать в основе проектируемой машины; максимально расширяют номенклатуру унифицированных сборочных единиц и основных деталей; производят расчленение машины на самостоятельные сборочные единицы; обеспечивают технологичность оригинальных деталей и выбирают для них рациональные заготовки.

На *этапе технического проекта* уточняют конструкцию машины и ее сборочных единиц и определяют конструктивную форму всех деталей; от-

рабатывают технологичность заготовок и выбирают для них наиболее простые конструкции сборочных единиц и деталей, а также баз сборки; определяют основные размерные цепи; обеспечивают выполнение основных технологических требований при механической обработке и сборке.

При *разработке рабочей документации* завершают отработку технологичности конструкции каждой детали, сборочной единицы и машины в целом. При этом проверяют выбор технологических баз деталей, постановку размеров и назначение допусков с учетом конструктивных и технологических требований; выбирают наиболее дешевые и недефицитные материалы; ограничивают номенклатуру применяемых марок и сортамента материала; проверяют соблюдение требований к конструкции заготовок (толщина стенок, радиусы переходов, уклоны, линии разъема и др.) и технологичности конструкции при механической обработке (доступность обработки, возможность входа и выхода инструментов, наличие надежных поверхностей для крепления деталей при обработке и др.), а также максимально возможную унификацию элементов конструкции (модулей, диаметров, резьб, шлицевых соединений и др.).

При отработке конструкции машины на технологичность необходимо установить соответствие между конструкцией машины и производственными условиями ее изготовления с учетом обоснованного применения материалов и рациональной преемственности конструктивно-технологических решений. Технологичность конструкции, являясь одним из показателей качества машины, в значительной степени определяет уровень технико-экономических показателей производства: тип и форму организации, наличие соответствующих условий и оборудования, продолжительность и серийность выпуска.

Обобщая приведенные рекомендации на этапах разработки проектно-конструкторской документации, *для обеспечения необходимого уровня технологичности конструкции машины* (а также ее сборочных единиц и деталей) *следует выполнить ряд требований:*

- 1) оптимальное расчленение машины и ее составных частей на независимые сборочные единицы;
- 2) широкое использование принципов конструктивной и технологической преемственности;
- 3) рациональное ограничение марок и сортов материалов;
- 4) рациональное назначение допусков и параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей;
- 5) разработка деталей, форма которых позволяет использовать высокопроизводительные методы и оборудование механической обработки;
- 6) обеспечение удобства базирования деталей при их обработке;
- 7) соблюдение условий взаимозаменяемости деталей, упрощение сборочных работ и создание возможности их механизации и автоматизации;

8) оптимальное упрощение (симплификация) конструкции сборочных единиц и деталей;

9) широкое использование стандартных, нормализованных и унифицированных деталей и узлов, а также их конструктивных элементов (модулей зубчатых колес, резьб, радиусов, галтелей и др.);

10) выбор типовых технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов.

При обработке конструкции деталей на технологичность учитывают организационно-технические условия их производства, возможности реализации ресурсосберегающих технологических процессов, а также объемы производства и серийность выпуска деталей, поскольку эффективные технические решения в условиях массового производства могут оказаться неэффективными в мелкосерийном производстве (и наоборот).

В машиностроении используют в основном два технологических процесса изготовления деталей: во-первых, методы, основанные на удалении слоя металла (точение, фрезерование, строгание, шлифование), и, во-вторых, методы без удаления металла (различные виды литья, методы пластического деформирования: штамповка,ковка, прокатка, волочение).

При назначении точности необходимо учитывать, помимо эксплуатационных требований, экономические затраты, связанные с методом механической обработки детали (рисунок 5.2). Требования к точности должны быть обоснованы расчетами, поскольку стоимость обработки детали является в ряде случаев определяющим фактором выбора метода обработки. Как видно из рисунка 5.1, стоимость обработки детали увеличивается быстрее, чем требования к точности: например, уменьшение допуска с 0,1 до 0,05 мм (т.е. в два раза) сопровождается увеличением стоимости обработки почти в 3 раза.

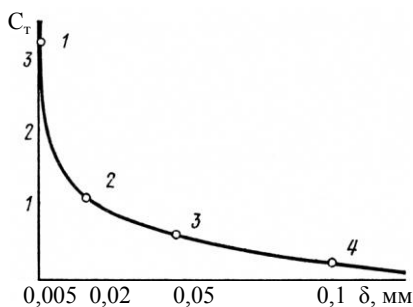


Рисунок 5.2 – Зависимость стоимости метода обработки детали от величины допуска размера:

- 1 – обточка, шлифовка и доводка;
- 2 – обточка и шлифовка;
- 3 – обточка;
- 4 – прокатка

Технологичность конструкции детали во многом связана с выбором баз при обработке детали, от которого зависят точность выполнения заданных размеров и точность обработки детали, конструкция приспособлений, тип режущего и измерительного инструмента. Поэтому при их выборе руководствуются принципами единства и постоянства баз.

Принцип единства баз (совпадение конструкторских, технологических и измерительных баз) обеспечивает минимальную технологическую себесто-

имость детали из-за отсутствия погрешностей базирования, ухудшающих точность обработки.

Принцип постоянства баз (использование одной технологической базы при обработке детали) также способствует повышению точности обработки, что, в конечном счете, отражается на технологичности детали в целом.

Уровень технологичности деталей определяется возможностями *механической обработки*. Конфигурация детали должна быть образована из элементов простых геометрических форм (цилиндров, плоскостей, конусов и др.), что позволяет использовать эффективные типовые технологические процессы обработки, а также применять высокопроизводительное оборудование, удобную, простую оснастку, средства механизации и автоматизации производства.

При изготовлении фасонных заготовок из листов для станин, рам, барабанов и т.п. вместо обработки на металлорежущих станках часто используют резку металлов, в частности, лазерными и плазменными методами.

В крупносерийном и массовом производстве стараются применять малоотходные виды обработки, в том числе методы литья. С их помощью получают детали достаточно сложной конфигурации (блоки двигателей внутреннего сгорания, рамы машин и др.).

При конструировании литых деталей (металлических отливок) используют приемы конструирования, обеспечивающие технологичность отливок деталей или заготовок, получаемых литьем. *Для литых заготовок действуют следующие ограничения:*

- форма отливок должна иметь минимальное число плоскостей разъема формы и исключать наличие замкнутых внутренних полостей и ступенчатых разъемов;

- наружные поверхности должны состоять из прямолинейных контуров, соединенных плавными переходами;

- толщина стенок должна исключать резкие отклонения в их размерах;

- форма заготовки должна обеспечивать легкое извлечение модели из формы (за счет наличия на отливках литейного уклона);

- крупные сложной формы заготовки разделяют на простые детали, соединяемые в последующем болтами или сваркой.

В зависимости от применяемого вида литья (литье в кокиль, в оболочковые формы, по выплавляемым моделям, под давлением и др.) требования к технологичности литых деталей могут дополняться и уточняться с учетом особенностей конструкции детали, ее назначения и условий эксплуатации, а также производственных возможностей.

Корпусные детали изготавливают литыми, сварно-литыми или штамповочно-сварными. Конструкции литых заготовок корпусных деталей должны отвечать следующим требованиям: толщина стенок в различных сечениях не

должна иметь резких изменений; деталь должна иметь правильную геометрическую форму с возможностью ее полной обработки от одной базы; должна быть обеспечена возможность обработки плоскостей и торцов с отверстиями напроход; размеры обрабатываемых отверстий внутри детали не должны превышать диаметры соосных им отверстий в наружных стенках детали; поверхности должны быть перпендикулярны осям отверстий.

Конструкция деталей, представляющих собой тела вращения (из прутка или штампованной заготовки), должна иметь небольшое количество обрабатываемых поверхностей, сопрягаемых с другими деталями. Их форма должна обеспечивать возможность штамповки заготовок в закрытых штампах, поэтому следует избегать удлиненных выступов, сечений с большой разностью площадей, глубоких полостей и т.п. Детали со сквозными отверстиями должны иметь конструкцию, предусматривающую обработку только сопрягаемых поверхностей; их форма должна обеспечивать возможность получения заготовок с минимальными припусками. Следует исключить возможность их деформирования при термической обработке.

Малые потери материала и высокий уровень автоматизации обеспечивают штамповке и другим видам пластического деформирования значительные преимущества при изготовлении деталей сравнительно простой формы. В ряде отраслей машиностроения доля штампованных деталей в выпускаемой продукции достигает 80–85 %.

Технологичность конструкций мелких деталей (из отливок, штамповок и прутков) обеспечивается небольшим количеством обрабатываемых поверхностей с минимальными припусками на обработку. Мелкие детали должны иметь форму, которая позволяет изготавливать их высокопроизводительными методами: штамповкой на ковочных машинах или ковочных прессах; литьем под давлением с одновременной формовкой и заливкой нескольких заготовок; изготовлением деталей из ленты на автоматизированных прессах; формообразованием деталей из пруткового материала методом холодной высадки или высадки с индукционным нагревом.

Для деталей, работающих при различных видах нагрузок (изгиб, растяжение и кручение), целесообразно применять штампованные заготовки или заготовки в виде поковок. Штамповка обеспечивает получение более качественной заготовки, но требует применения дорогостоящих штампов.

Особенности технологических процессов обработки давлением следует учитывать при выборе формы деталей, к которым предъявляются специфические требования к технологичности конструкции. При использовании горячей штамповки необходимо предусмотреть возможность сокращения числа переходов, операций и минимизацию последующей механической обработки, а также изготовление деталей на простых и доступных штампах. При штамповке на молотах и прессах деталь должна иметь разъемную гео-

метрическую форму с наличием штамповочных уклонов на вертикальных стенках, а также плавные скругленные контуры.

Пространственные детали сложной формы в основном изготавливают с применением холодной штамповки. Способ холодной штамповки (гибка, вытяжка, холодное выдавливание, холодная объемная штамповка и др.) определяет совокупность требований, характеризующих технологичность детали. При конструировании деталей, получаемых штамповкой, придерживаются в основном тех же требований, что и при конструировании отливок. Например, в штампованных деталях также стараются избегать малых радиусов скруглений, резких перегибов или переходов от одного сечения к другому, существенных различий в толщине стенок одной детали. В них также предусматривают технологические уклоны, технологические отверстия и другие технологические элементы.

Автоматизированная (тем более автоматическая) сборка обуславливает дополнительные требования. Они относятся к форме деталей и соединениям сборочных единиц, к предварительной ориентации и направлению движения детали при сборке, к вспомогательному оборудованию и способам сборки разъемных и неразъемных соединений. Как правило, стремятся использовать детали простой симметричной формы с односложным, желательно прямолинейным движением при сборке.

При автоматизированной сборке повышают технологичность сборочного процесса различными приемами: совмещают процессы изготовления отдельных простых деталей и их сборки; производят предсборочное группирование деталей; используют центрирующие элементы, обеспечивающие точность ориентации деталей в начальный момент соединения и последовательное сопряжение поверхностей; применяют направляющие элементы, фаски, скругления, конусы и канавки, облегчающие начальную ориентацию деталей соединения. Как и в других случаях, в максимальной степени применяют унифицированные элементы соединений. В конструкции сборочных единиц стремятся избегать соединений, которые сложно осуществить автоматически (например, шпоночных, штифтуемых, шплинтуемых, заклепочных и др.).

Сборка упрощается с применением разрезных стопорных колец для фиксации подшипников качения и других деталей в осевом направлении на шейках валов и в расточках корпусных деталей (вместо установки шайб с винтами и фиксирующих гаек). Особое внимание уделяют установке в корпус и на вал манжетных уплотнений, монтаж которых целесообразно осуществлять с помощью оправок, поскольку при протягивании уплотнения по шлицам, шпоночным пазам или резьбе возможны их повреждения.

Автоматизированное сборочное оборудование по сравнению с ручной сборкой требует более жестких допусков на детали. При автоматизирован-

ной сборке методы полной, неполной или групповой взаимозаменяемости, пригонки и регулирования используют в различной степени. Наиболее просто осуществляют сборку при полной взаимозаменяемости. Неполная и групповая взаимозаменяемость требуют дополнительных устройств контроля и усложняют систему управления. Еще сложнее осуществить автоматизированную сборку, используя пригонку или регулирование.

Значительную роль в обеспечении технологичности при сборке играют крепежные и другие приспособления. Базовые детали должны просто и надежно устанавливаться и закрепляться в приспособлениях манипуляторов или роботов. При разработке конструкции деталей и соединений, особенно тяжелых деталей или сложно собираемых соединений, должны быть предусмотрены специальные монтажные элементы (детали, поверхности, отверстия и другие части устройств), за которые можно надежно захватить деталь (или сборочную единицу). Их также используют для облегчения направления, ориентации и центрирования соединений. В ряде случаев для размещения элементов съемника предусматривают специальные реборды или гнезда.

Технологичность машины в целом в значительной степени зависит от конструкции отдельных неразборных узлов и агрегатов. В большинстве машин пока предусматривают достаточно простые малогабаритные неразборные узлы при их массовом и автоматизированном производстве (электродвигатели, насосы, клапаны, форсунки и др.). Основным условием для выбора подобных решений является экономическая эффективность замены узла в целом.

Показатели производственной технологичности конструкции бывают двух видов: качественные и количественные. Качественная оценка, как правило, предваряет количественную и базируется на сопоставлении и анализе разрабатываемого и базового вариантов. Количественная оценка необходима для выявления конкретных преимуществ разрабатываемой конструкции детали, узла или машины в целом.

Количественные показатели позволяют детально раскрыть уровень технологичности конструкции проектируемой машины. Из широкого перечня показателей технологичности, приведенных в стандарте, целесообразно выделить показатели, которые в наибольшей степени дают объективную оценку разрабатываемой машины. В частности, по значимости различают основные и дополнительные показатели, которые в свою очередь могут быть абсолютными и относительными (последние дают сравнительную характеристику проектируемого и базового варианта машины). За *базовый вариант* принимают конструкцию машины, основные составные части которой используют при проектировании разрабатываемой машины, или же конструкцию *аналога*.

К наиболее значимым показателям производственной технологичности следует отнести:

- 1) трудоемкость изготовления;
- 2) технологическую себестоимость;
- 3) удельную материалоемкость;
- 4) коэффициент использования материала;
- 5) коэффициенты унификации деталей и конструктивных элементов.

При оценке эксплуатационной и ремонтной технологичности обычно учитывают трудоемкость и стоимость технического обслуживания и ремонта машин.

Для определения основных показателей используют статистические данные о машинах, имеющих общие конструктивно-технологические признаки с проектируемой машиной. Значения основных показателей технологичности конструкции часто приводят в техническом задании на проектирование.

Уровень технологичности конструкции машины в целом ($K_{\text{тех}}$) определяют как отношение достигнутого проектного уровня технологичности $K_{\text{д}}$ к базовому $K_{\text{б}}$, установленному техническим заданием на проектирование:

$$K_{\text{тех}} = K_{\text{д}} / K_{\text{б}}$$

Его оценивают по показателям, принятым для оценки технологичности конструкции в техническом задании на машину.

Трудоемкость изготовления $T_{\text{н}}$ проектируемой машины рассчитывают по формуле

$$T_{\text{н}} = \sum T_i n_i + \sum T_j n_j + T_{\text{сб}}$$

где T_i – трудоемкость i -й сборочной единицы в изготовлении, ч;

T_j – трудоемкость j -й детали, не вошедшей в состав сборочных единиц, ч;

n_i, n_j – число i -х сборочных единиц и j -х деталей соответственно;

$T_{\text{сб}}$ – трудоемкость общей сборки машины, включая последующие испытания, ч.

Уровень технологичности конструкции по трудоемкости изготовления характеризуют отношением достигнутой (проектной) трудоемкости $T_{\text{д}}$ к базовой $T_{\text{б}}$, т. е. коэффициентом

$$K_{\text{т}} = T_{\text{д}} / T_{\text{б}}$$

Технологическую себестоимость можно найти из выражения

$$C_{\text{т}} = M + T + Z_{\text{о}} + C,$$

где M – расходы на сырье и материалы (без учета стоимости отходов);

T – стоимость топлива и энергии, идущих на технологические цели;

$Z_{\text{о}}$ – заработная плата основных производственных рабочих;

C – расходы, связанные с содержанием и эксплуатацией оборудования, затраты на инструмент и приспособления, зарплата вспомогательных работников и т.п.

Уровень технологичности конструкции по технологической себестоимости характеризуют коэффициентом

$$K_{с.т} = C_{т.д} / C_{т.б},$$

где $C_{т.д}$, $C_{т.б}$ – достигнутая (проектная) и базовая технологическая себестоимость машины соответственно.

Уровень технологичности по материалоемкости определяют соотношением достигнутой (проектной) материалоемкости машины M_d и базовой (или аналога) M_b :

$$K_m = M_d / M_b.$$

Материалоемкость машины характеризует общее количество затраченного материала на производство одной модели.

При оценке технологичности заготовки применяют коэффициент использования материала

$$K_{и.м} = M_{дет} / M_{заг},$$

где $M_{дет}$ – масса детали, кг;

$M_{заг}$ – масса заготовки для этой детали, т.е. норма расхода материала на данную заготовку, кг.

Массу заготовки рассчитывают после выбора способа ее получения и определения общих припусков на механическую обработку.

По этим показателям оценивают уровень технологичности конструкции машины по сравнению с конструкцией базового варианта или аналога.

Коэффициент унификации деталей машины определяют из выражения

$$K_{у.д} = D_y / D,$$

где D_y – число унифицированных деталей;

D – общее число деталей в машине.

Коэффициент унификации конструктивных элементов

$$K_{у.э} = Q_{у.э} / Q_э,$$

где $Q_{у.э}$ – число унифицированных типоразмеров конструктивных элементов;

$Q_э$ – общее число типоразмеров конструктивных элементов в машине.

Эти коэффициенты характеризуют степень унификации материалов, деталей и конструктивных элементов. Для повышения технологичности машины и ее составных частей стремятся к сокращению номенклатуры материалов и снижению числа разнотипных деталей и элементов. Чем больше коэффициенты унификации деталей и конструктивных элементов, тем более технологичными считаются конструкции в производстве.

Помимо перечисленных показателей, важными характеристиками технологичности, связанными с ресурсосбережением, являются удельные показатели материало- и энергоемкости машины, которые рассмотрены ранее.

Как отмечалось, эксплуатационная технологичность характеризует свойство машины сохранять эксплуатационные и функциональные показатели при минимальных затратах. Возможности машины по сокращению простоев (при подготовке к эксплуатации, техническом обслуживании, ремонте и др.) и ускорению ее перевода в работоспособное состояние зависят от многих факторов, в их числе контролепригодность, доступность, легкосъемность, взаимозаменяемость, восстанавливаемость, преемственность, эргономичность, транспортабельность, сохраняемость, гигиеничность и др.

Контролепригодность характеризуется наличием встроенных средств контроля технического состояния и режимов работы машины и ее сборочных единиц, а также устройств, обеспечивающих подключение внешних средств диагностической аппаратуры и диагностирование параметров без демонтажа составных частей и сборочных единиц. Контроль состояния машины при техническом диагностировании способствует предотвращению простоев из-за технических неисправностей. Применение современных диагностических средств на 70–75 % ускоряет процесс контроля технического состояния по сравнению с обычными методами проверки основных систем машин (с частичной разборкой механизмов). Измерение диагностических параметров должно осуществляться с достаточной точностью, поскольку большая погрешность измерения может привести к ошибочному диагнозу, а малая – к увеличению стоимости средств диагностирования.

Доступность с учетом требований эргономики характеризуется свободным доступом к местам технического обслуживания и ремонта с необходимым инструментом, возможностью применения средств механизации и автоматизации, а также выполнением технического обслуживания сборочных единиц без демонтажа.

Легкосъемность связана с рациональным расчленением составных частей за счет применения блочного принципа компоновки машин. Монтажная законченность сборочных единиц позволяет организовать агрегатный метод ремонта (с использованием обменного фонда) и снизить трудоемкость устранения отказов. Легкосъемность составных частей и сборочных единиц обеспечивается с помощью износостойких элементов стыковки и демонтажных баз для деталей, имеющих посадку с натягом; приспособлений (захватов, рым-болтов, проушин и т. д.), облегчающих снятие и установку составных частей большой массы; штекерных соединений в системе электрооборудования; выполнение замков, не требующих применения инструмента для их закрывания и открывания, на крышках люков и аккумуляторов.

Взаимозаменяемость составных частей и сборочных единиц позволяет производить их сборку или замену без предварительной подгонки. В противном случае усложняется процесс разборки, дефектации и комплектова-

ния деталей, а отказ изготовленных без учета взаимозаменяемости деталей приводит к необходимости замены всей сборочной единицы и увеличению расхода запасных частей, что усложняет ремонт.

Восстанавливаемость машины определяется, прежде всего, возможностями восстанавливаемости ее деталей, составных частей и механизмов. Она зависит от применяемых материалов, конструкций деталей и узлов, технологии их восстановления. В частности, можно отметить следующие факторы:

1) возможность применения экономичных и эффективных методов восстановления деталей и элементов конструкций; легкоъемных элементов (втулок, венцов, колец, вкладышей и др.), подвергающихся интенсивному износу, а также съемных элементов в посадочных местах подшипников корпусных деталей (коробок передач, бортовых редукторов и т.п.);

2) возможность повторного использования деталей путем изменения их положения или места в сборочной единице;

3) значения коэффициентов унификации деталей и конструктивных элементов (деталей, шарнирных соединений, стыковочных узлов, разъемов, элементов электрооборудования, инструмента и т. п.);

4) наличие деталей и конструкций, требующих для восстановления сложной термо- или химико-термической обработки и специальных приспособлений.

Преимственность технологических процессов технического обслуживания обеспечивает возможность применения к разрабатываемым машинам типовых процессов технического обслуживания и ремонта, подготовки к эксплуатации и хранению, методов восстановления деталей и конструкций. Повышению уровня преимущественности способствует не только унификация, но и типизация конструкции.

Эргономичность характеризуют удобством размещения оператора, управления машиной и ее обслуживания с минимальными затратами труда. Повышению эргономических параметров машин способствуют адаптивные системы управления, активные системы гашения колебаний места оператора в широком диапазоне частот и амплитуд, сиденья с регулируемыми параметрами в зависимости от антропологических данных оператора, звуко-, пыле- и температурная изоляция кабины и ее кондиционирование.

Значительно облегчается работа оператора по управлению агрегатами и механизмами при оснащении машины бортовыми компьютерами и микропроцессорной техникой. Ранее упомянутые диагностические системы (с индексацией данных на панели приборов, где указывается место и характер дефекта), встроенные в узлы и агрегаты, ускоряют поиск и устранение неисправностей.

Транспортбельность оценивают приспособленностью машин к передвижению и определяют временем переналадки из рабочего положения в

транспортное и обратно, а также удобством перевозки машины другим видом транспорта (например, железнодорожным). Транспортабельность повышают за счет применения гидравлических и пневматических приспособлений, механизмов и специальных тележек. Транспортабельность характеризуют показателем, равным произведению конструктивной массы машины на ее площадь, занимаемую в транспортном положении.

Сохраняемость машины оценивают по возможности ее хранения на открытой площадке, под навесом или в помещении; числом составных частей и сборочных единиц, требующих герметизации или консервации; количеством необходимых консервационных материалов, а также потребностью в специальной установке или упаковке.

Гигиеничность определяется внешним видом и состоянием поверхностей составных частей машины, подлежащих обслуживанию, а также необходимостью и возможностью их очистки и мойки перед проведением работ. Наибольшую загрязненность имеют поверхности с подтеками смазывающих, рабочих и других жидкостей, которые плохо поддаются мойке и очистке. Опасность загрязнения обслуживающего персонала может снизить производительность работ и привести к их некачественному исполнению.

Высокому уровню ремонтной технологичности машин способствует повышение эффективности их использования, а также снижение затрат труда и материалов при обеспечении необходимого качества ремонта.

Уменьшение числа текущих и капитальных ремонтов без сокращения срока службы обеспечивается при разработке составных частей и сборочных единиц с высокими показателями надежности, а снижение трудоемкости и стоимости ремонтов, потребность в ремонтно-технологическом оборудовании – технологичностью конструкции.

Компоновка сборочных единиц должна обеспечивать общую сборку машины без промежуточной разборки и последующих сборок составных частей. Средние ресурсы составных частей и сборочных единиц машины по возможности должны быть кратными между собой или близкими к ним.

Точность расположения составных частей и сборочных единиц должна быть обоснована и взаимосвязана с точностью их изготовления, конструкции составных частей должны предусматривать центрирующие, ориентирующие и компенсирующие устройства, обеспечивающие снижение затрат труда при разборке и сборке.

Отработка конструкции на эксплуатационную и ремонтную технологичность направлена на снижение трудоемкости и стоимости технического обслуживания и ремонта, а также на сокращение простоев. Этому способствуют упомянутые ранее мероприятия:

- 1) широкое использование современных методов и средств диагностирования технического состояния машин;
- 2) совершенствование организации технического обслуживания и ремонта машин;

- 3) расширение сервисной службы предприятий – изготовителей машин;
- 4) применение типовых процессов технического обслуживания и ремонта основных узлов и механизмов машин;
- 5) повышение квалификации обслуживающего персонала;
- 6) развитие системы постоянного контроля за работой машин, включая спутниковую или радионавигационную систему наблюдения, комплект датчиков контроля за работой узлов и агрегатов машин, бортовые компьютеры для анализа и вывода данных и соответствующее программное обеспечение.

Технологичность конструкции с точки зрения утилизации материалов после списания машины связана со снижением трудоемкости и стоимости разборки машины и сортировки материалов по группам, а также с потребностью в ремонтно-технологическом оборудовании для осуществления этих операций. Кроме материалов, имеются различные рабочие жидкости, в том числе токсичные, взрывоопасные и агрессивные по отношению к металлам.

При выборе технологии утилизации, как правило, подбирают наиболее дешевые методы с учетом экологической безопасности этих методов переработки отходов, т.е. необходимо обеспечивать разумный баланс между стоимостью методов утилизации и рециклинга и экологической безопасностью этих методов переработки. По возможности стремятся сделать переработку рентабельной, чтобы стоимость изделий из отходов не превышала стоимости деталей из первичных материалов.

5.3 Специализация производства и типизация технологических процессов при изготовлении деталей

Внедрение в производство высокопроизводительного оборудования и ресурсосберегающих технологий требует расширения и углубления специализации на предприятиях, комплексной отработки конструкции изделия на технологичность, расширенного применения методов стандартизации и унификации при технологической подготовке производства.

Для того чтобы эффективно использовать современные методы повышения работоспособности машин, следует иметь представление об основах технологии их производства.

Производственный и технологический процессы. Производственный процесс – это совокупность взаимосвязанных действий людей, средств и орудий производства, а также технологических операций, необходимых для изготовления выпускаемых изделий. Изделиями могут быть машины, агрегаты, отдельные узлы или сборочные единицы, детали или даже заготовки. Поэтому и содержание производственного процесса на предприятиях будет различным.

Процесс производства машин связан с координированным выполнением различных *видов работ*:

- изготовлением заготовок;
- обработкой, транспортировкой и хранением деталей;
- сборкой узлов и машин;
- техническим контролем на всех стадиях производства;
- техническим обслуживанием и ремонтом средств производства;
- обслуживанием рабочих мест;
- получением, хранением и подготовкой к использованию сырья, полуфабрикатов и т. д.

Основу производственного процесса составляет технологический процесс изготовления изделий. Он включает комплекс технологических операций, необходимых для изготовления выпускаемых изделий (деталей, сборочных единиц, машин).

Технологические процессы разделяют по следующим основным признакам:

- по *организации* – единичные, типовые и групповые;
- по *назначению* – перспективные, рабочие и комплексные;
- по *степени детализации* (описания) – маршрутные, операционные и маршрутно-операционные.

Технологический процесс выбирают в зависимости от условий производства, количества однотипных и разнотипных деталей.

Единичный технологический процесс разрабатывают для изготовления или ремонта деталей (или сборочных единиц) одного наименования и типоразмера независимо от типа производства. Такие единичные процессы используют для механической обработки оригинальных деталей (или сборочных единиц), которые не имеют конструктивно-технологического сходства с изделиями, ранее изготовленными на предприятии.

При серийном производстве деталей широкой номенклатуры стремятся использовать унифицированный подход к разработке технологий изготовления деталей, в основе которого лежит группирование деталей по конструктивно-технологическому признаку. По этому признаку различают типовой и групповой процессы.

Типовой технологический процесс разрабатывают для изготовления или ремонта группы деталей, которые имеют общие конструктивные и технологические признаки, т.е. конструктивно-технологическое сходство. Его могут использовать для различных целей: во-первых, в качестве рабочего технологического процесса; во-вторых, в качестве информационной базы при разработке нового рабочего процесса; в-третьих, при разработке стандартов на типовые технологические процессы. Как правило, типовой технологический процесс применяют при массовом и крупносерийном производстве деталей.

Групповой технологический процесс разрабатывают для изготовления или ремонта группы деталей, которые имеют различные конструктивные,

но общие технологические признаки, т.е. это комплекс однородных технологических операций в отношении деталей различной конструкции. Групповой процесс способствует ограничению конструктивных разновидностей технологической оснастки. Изготовление деталей различной конфигурации с помощью одного приспособления обеспечивают использованием сменных или регулируемых элементов. В основном процесс разрабатывают и используют только в рамках и для нужд предприятия.

Рабочий технологический процесс – это процесс изготовления или ремонта детали одного типоразмера, который осуществляют на предприятии в соответствии с требованиями разработанной на этом же предприятии рабочей технической документации.

Комплексный технологический процесс включает как технологические операции обработки деталей, так и вспомогательные операции (перемещения, очистки, контроля и др.). Комплексный процесс используют для автоматических линий и гибких автоматизированных производственных систем.

Объектами изготовления или ремонта могут быть машины, агрегаты, отдельные узлы или сборочные единицы, детали или даже заготовки. Поэтому и содержание производственного процесса на предприятиях будет различным. Крупные предприятия машиностроительного комплекса производят машины или отдельные агрегаты и работают в основном по полному технологическому циклу, который включает заготовку и обработку деталей из поставляемых им материалов, а также сборку узлов и машин. Как правило, предприятия, выпускающие машины, осуществляют сервисное обслуживание своей продукции. Более мелкие организации в рамках кооперации с ведущими предприятиями специализируются на производстве деталей определенного вида (валов, зубчатых колес, крепежных деталей и др.) или заготовок (например, поковок, отливок).

Типы и виды машиностроительного производства. Тип производства – это категория производства, которая отличается масштабом номенклатуры, регулярностью, стабильностью и объемом выпуска изделий машиностроения.

Одной из основных характеристик типа производства является коэффициент закрепления операций – отношение количества различных технологических операций, выполненных в течение месяца, к числу рабочих мест:

$$K_{30} = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{шт}}} = \frac{60FmK_{\text{от}}}{N_{\text{мес}}t_{\text{шт}}}, \quad (5.1)$$

где $t_{\text{в}}$ – такт выпуска детали, мин;

$t_{\text{шт}}$ – штучное время, мин;

F – месячный фонд времени односменной работы рабочего места, ч;

m – принятое число смен;

$k_{от}$ – коэффициент учета простоев по организационно-техническим причинам;

$N_{мес}$ – число деталей в производстве, шт./мес.

В машиностроении производства классифицируют по следующим признакам:

- 1) по типу – единичное, серийное и массовое;
- 2) по виду специализации – механическое, механосборочное, литейное, кузнечное и т.п.;
- 3) по форме организации – поточное (непрерывно-поточное и прямоточное) и непоточное.

Технологический процесс изготовления (или ремонта) деталей, применяемые при этом оборудование, приспособления и инструмент определяют, как правило, числом однотипных деталей.

Единичное производство характеризуется широкой номенклатурой и небольшим количеством однотипных деталей, т.е. детали каждого типа изготавливают (или ремонтируют) в малых количествах и нерегулярно. В этом случае приходится пользоваться универсальным оборудованием, так как затраты на специальную оснастку и специальное оборудование не окупаются. Кроме того, ограничены возможности механизации работ, для выполнения которых необходимо привлекать высококвалифицированных специалистов. Поэтому себестоимость продукции значительно выше, чем для других типов производства. Единичное производство применяют, как правило, для изготовления опытных образцов машин, а также различного оборудования по специальным заказам, когда экономическая составляющая производства не является определяющей.

Серийное производство характеризуется ограниченной номенклатурой деталей, изготавливаемых (или ремонтируемых) в больших количествах повторяющимися партиями. На рабочих местах приходится выполнять по несколько периодически повторяющихся операций.

В зависимости от повторяемости выпуска изделий различают крупно-, средне- и мелкосерийное производство.

Для серийного производства характерны следующие признаки:

- 1) применение как универсального, так и специального оборудования и приспособлений;
- 2) размещение оборудования как по потоку (крупносерийное), так и группой – токарные станки, фрезерные станки (мелкосерийное);
- 3) необходимость периодической переналадки станков с одной операции на другую;
- 4) необходимость межоперационного складирования изготавливаемых деталей.

Массовое производство характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска деталей, непрерывно изготавливаемых (или ремонтируемых) в течение длительного времени. Детали изготавливают непрерывно в течение продолжительного времени и в больших количествах, что позволяет закрепить за каждым рабочим местом только одну операцию. При этом широко применяют специальное оборудование, механизацию и автоматизацию производственного процесса. Оборудование размещают в соответствии с технологической последовательностью работ по потоку.

Различные типы машиностроительных предприятий отражают принципы специализации, без которых невозможно совершенствование продукции. Как правило, в основе специализации лежит подбор деталей по принципу конструктивно-технологического сходства (с сокращением номенклатуры выпускаемых деталей). Результатом является повышение эффективности производства и качества продукции за счет применения специализированного оборудования и автоматизации производства. Имеются две формы специализации производства: технологическая и предметная.

При *технологической специализации* выполняется комплекс однородных технологических операций в отношении различных деталей. По такому признаку специализированы литейные заводы, а также кузнечные, штамповочные и механические цехи.

При *предметной специализации* выполняются разнородные технологические процессы по отношению к одинаковым деталям. По такому признаку специализированы моторные заводы, участки изготовления валов, зубчатых колес и др.

Тип производства и соответствующие ему формы организации труда во многом определяют структуру технологического процесса. Тип производства (единичное, серийное или массовое) характеризуется номенклатурой и объемом выпуска изделий, их массой и габаритными размерами. Для механической обработки деталей тип производства можно установить, используя таблицу 5.1. Следует отметить, что такая градация в известной степени условна и со временем границы классификационных признаков меняются, в частности, если раньше массу мелких или легких деталей (M) считали равной 1 кг, то в настоящее время – до 20 кг.

В массовом и крупносерийном производстве применяют *поточные методы работы*, в частности, непрерывно-поточные линии (например, конвейеры), в которых длительность выполнения операций четко и строго синхронизирована по времени и согласована с тактом производства: они равны или кратны такту (в последнем случае необходимо дублирование таких рабочих мест). *Тактом производства* считают время выпуска единицы продукции.

Таблица 5.1 – Выбор типа производства

Тип производства	Число обрабатываемых деталей в год		
	мелких ($M \leq 20$ кг)	средних ($20 \text{ кг} < M \leq 300$ кг)	крупных ($M > 300$ кг)
Единичное	< 100	< 10	< 5
Мелкосерийное	100–500	10–200	5–100
Среднесерийное	500–5000	200–1000	100–300
Крупносерийное	5000–50000	1000–5000	300–1000
Массовое	> 50 000	> 5 000	> 1 000
<i>Примечание – M – масса детали, кг.</i>			

Наряду с непрерывно поточными линиями имеются прямоточные (прерывно-поточные) линии, в которых обеспечивается равная пропускная способность всех рабочих мест за установленный отрезок времени. При работе в этом режиме возникают межоперационные заделы, что несколько снижает эффективность таких линий.

В целом поточный метод обеспечивает:

- четкость управления производством;
- широкие возможности механизации и автоматизации производственных процессов;
- применение специального высокопроизводительного оборудования;
- сокращение пути движения и времени изготовления детали.

Эффективность поточного метода растет с увеличением объема выпуска однотипных деталей на предприятии. Для повышения производительности используют также гибкие автоматизированные производства. Их основными элементами являются станки с числовым программным управлением и станки типа «обрабатывающий центр», манипуляторы и робототехнические системы, а также автоматизированные складские, уборочные и транспортные средства, оснащенные бортовыми компьютерами и микропроцессорной техникой.

Методы изготовления деталей машин. В строительных, дорожных, подъемно-транспортных машинах применяют детали и конструкции различного назначения и геометрии:

- валы (гладкие, ступенчатые, коленчатые, кулачковые и др.);
- валы-шестерни, червяки, оси;
- втулки, гильзы, цилиндры и барабаны;
- дискообразные детали (шкивы, маховики, цилиндрические и конические зубчатые колеса и др.);
- балки и рычаги;
- корпусные детали (блоки цилиндров, картеры механизмов и др.);
- крепежные детали (болты, шпильки, гайки, шпонки и др.).

Многообразие деталей определяет различные варианты технологического процесса их изготовления.

Разработка технологического процесса включает выбор способов получения заготовок и методов их обработки и переработки в детали, а также сборку узлов, агрегатов и машины в целом. В их основе лежит уже упомянутый технико-экономический принцип: технологический процесс должен обеспечивать выполнение всех требований ЕСКД и ЕСТД, а также высокое качество и надежность эксплуатации машины, но с минимальными затратами ресурсов предприятия.

Виды заготовок и способы их получения. При выборе исходных заготовок деталей необходимо найти способ получения заготовки, рассчитать припуски с учетом формы детали, рассчитать размеры и указать допуски на заготовку.

Основными видами заготовок являются заготовки, полученные литьем, обработкой давлением, резкой сортового и профильного проката, комбинированными и специальными методами. В машиностроении применяют следующие виды заготовок:

- отливки (из чугуна, стали, сплавов цветных металлов и пластмасс);
- поковки и штамповки (из стали и сплавов цветных металлов);
- прокат из стали и сплавов цветных металлов;
- сварные заготовки;
- заготовки из металлокерамики;
- заготовки из пластмасс и композитов на основе полимеров.

При разработке технологического процесса выбирают способы получения заготовок, поскольку вид заготовки задают при проектировании детали. Для получения отливок применяют следующие способы:

– литье в земляные формы, изготовленные ручной или машинной формовкой по деревянным или металлическим моделям;

- литье в кокили;
- центробежное литье;
- литье под давлением;
- литье по выплавляемым моделям;
- литье в оболочковые формы;
- экструзия в пресс-формы.

Для получения поковок и штамповок используют:

- свободную ковку с применением различных молотов и ковочных прессов;
- ковку в подкладных штампах;
- штамповку в открытых и закрытых штампах на молотах и прессах;
- горячую штамповку на горизонтально-ковочных машинах;
- холодную штамповку.

Для получения заготовок из проката применяют:

- нарезание на гильотинных и прессовых ножницах;
- нарезание на приводных ножовках и дисковыми пилами;
- резку лазерную, плазменную, кислородную, электроискровую и анодно-механическую.

Металлокерамические заготовки получают прессованием специальных порошковых смесей с последующим спеканием методами порошковой металлургии.

Заготовки из пластмасс получают прессованием или литьем в пресс-формы.

Выбор способа получения заготовки производится с учетом следующих факторов:

- конфигурации, размеров и массы детали;
- материала детали, метода ее термической или химико-термической обработки;
- необходимой точности размеров заготовки и качества поверхностей;
- количества заготовок;
- технологического оборудования предприятия.

Если предприятие располагает оборудованием для получения заготовок различными способами, выбор способа определяется экономическими факторами в зависимости от программы выпуска и себестоимости детали для каждого способа.

Методы механической обработки при изготовлении деталей. Для изготовления деталей используют все известные методы обработки конструкционных материалов (точение, фрезерование, строгание, сверление, зенкерование, развертывание, протягивание, шлифование, хонингование, шабрение, притирка, полирование). Кроме них применяют специальные методы: накатывание, дорнование, электроискровую и анодно-механическую обработку.

Для их осуществления используют *лезвийные* (резцы, фрезы, сверла, протяжки, развертки и др.), *абразивные* (шлифовальные круги, бруски) и *специальные* инструменты.

Выбор метода обработки зависит от многих факторов: физико-механических свойств материала детали, формы ее поверхности, геометрии и шероховатости, требований к точности размеров, наличия оборудования. Каждый метод обработки обеспечивает некоторые значения средней (экономически оптимальной) точности и шероховатости. Как правило, методы, обеспечивающие высокую точность, дают и низкую шероховатость. В качестве примера можно привести данные таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Влияние обработки на характеристики поверхности детали

Вид обработки	Квалитет	Шероховатость R_a , мкм
Точение: предварительное тонкое	12–13	12,5
	6–7	0,63–0,32
Фрезерование: предварительное тонкое	11–12	12,5
	6–7	0,63–0,32

Разработка технологического процесса изготовления деталей. Техпроцессы разрабатываются при подготовке к выпуску новых или модернизации освоенных машин, а также при внедрении нового технологического оборудования и изменении объемов производства.

Исходными данными для разработки технологических процессов служат:

- рабочие чертежи деталей;
- годовая программа выпуска деталей;
- технические характеристики оборудования;
- справочные материалы.

Разработку предваряет технологический контроль чертежей для проверки спроектированных деталей на технологичность их конструкции.

Разработка технологического процесса регламентирована стандартом (ГОСТ 14.301–83), который используется и поныне. Для единичного технологического процесса она включает следующие основные этапы:

- анализ исходных данных;
- выбор типового (или группового) техпроцесса;
- установление требований по экологической безопасности процесса;
- выбор рационального способа получения заготовки;
- выбор технологических баз;
- составление технологического маршрута изготовления детали;
- разработка технологических операций;
- нормирование техпроцесса (установление норм расхода материала, норм времени на обработку, квалификации исполнителей);
- расчет экономической эффективности технологического процесса;
- оформление технологической документации.

Детализация разработки технологической документации зависит от стадии подготовки и типа производства. На стадиях предварительного проекта и изготовления опытной партии технологическую документацию выполняют в маршрутном описании (т.е. в сокращенном описании всех технологических операций без указания переходов и технологических режимов) или маршрутно-операционном описании (с указанием переходов и режимов).

На стадии подготовки серийного или массового производства технологическую документацию оформляют в операционном описании с составлением полного комплекта документов по ЕСТД.

Для единичного и мелкосерийного производства, как правило, ограничиваются маршрутным или маршрутно-операционным описанием.

Выбор методов и последовательности обработки детали. При разработке техпроцесса прежде всего определяют методы окончательной обработки поверхности и выбирают оборудование, которое может обеспечить

необходимое качество. Затем планируют всю последовательность обработки поверхности детали. При этом каждый последующий этап должен быть точнее предыдущего (с учетом необходимости выбора технологического припуска на каждом этапе обработки).

Таким образом, намечают общий план обработки детали, содержание отдельных операций и выбор типа оборудования, что составляет основу технологического маршрута обработки детали.

Исходным при разработке технологического маршрута является типовой технологический процесс изготовления деталей данного типа (валов, зубчатых колес и др.). Затем маршрут уточняют с учетом особенностей конкретной детали и данного производства.

Первыми обрабатывают поверхности детали, принятые за технологические базы. Затем обрабатывают остальные поверхности: чем точнее поверхность, тем позже ее обрабатывают. Заканчивают процесс обработкой поверхности, которая является наиболее точной и определяет работоспособность детали.

В маршрут включают операции по термической обработке. Закалку, цементацию и последующую закалку проводят до окончательной обработки (шлифования), цианирование, азотирование – после шлифования.

Перед механической обработкой (в целях улучшения обрабатываемости и снятия остаточных напряжений) осуществляют отжиг, нормализацию и улучшение (закалку).

Расчет припусков на обработку. Припуск на обработку – это слой металла, снимаемый с заготовки в процессе механической обработки для получения детали с заданными точностью размеров и качеством поверхности.

Различают припуски промежуточные и общие. *Промежуточный припуск* – это толщина слоя металла, снимаемого при выполнении одного перехода или операции. *Общий припуск* – толщина слоя металла, которая снимается в результате выполнения всех технологических операций и переходов при механической обработке.

Припуск должен иметь оптимальную толщину, поскольку с одной стороны его увеличение дает повышенные отходы, энергоемкость и материалоемкость, а с другой – понижение способствует увеличению вероятности брака, так как невозможно получить необходимую точность и шероховатость поверхности без удаления дефектного поверхностного слоя.

В машиностроении применяют в основном расчетно-аналитический метод определения припусков. Он основан на раздельном учете факторов, влияющих на их величину. После определения припусков по всем операциям и переходам в отдельности устанавливают операционные размеры деталей. Расчет операционных размеров начинают с установления (и вычерчи-

вания) размеров готовой детали. Затем на все обрабатываемые поверхности накладывают (в последовательности, обратной последовательности механической обработки) операционные припуски с округлением результатов в большую (для наружных поверхностей) и в меньшую (для внутренних поверхностей) сторону.

На операционные размеры устанавливают допуски (с учетом известных требований). При соблюдении размера детали в границах допуска припуск на последующую операцию должен быть не меньше минимально допускаемого.

Выбор оборудования и инструмента. Станочное оборудование и необходимые приспособления выбирают с учетом конструкции и размеров детали, необходимой точности, чистоты обработки, производительности и минимальной себестоимости работ.

Режущий инструмент выбирают с учетом требуемой точности и чистоты обработки, способа крепления на выбранном станке или приспособлении, простоты в изготовлении и заточке, использования стандартных режущих инструментов, необходимой износостойкости материала инструмента.

Измерительный инструмент выбирают с учетом требований точности, удобства и быстроты измерений.

Определение параметров обработки. Режимы обработки характеризуются глубиной резания, подачей и скоростью резания. Как правило, исходят из наименьшей себестоимости обработки детали с заданной чистотой и точностью (с учетом износостойкости режущего инструмента, т. е. продолжительности работы между двумя переточками). При расчетах сначала выбирают глубину резания, затем подачу и скорость резания.

Глубину резания при грубой обработке берут равной величине припуска. Полуцистовую и чистовую обработку выполняют за несколько проходов (с малой глубиной на последних проходах для обеспечения заданной точности и шероховатости).

В зависимости от глубины резания назначают максимально возможную величину подачи. При черновой обработке величина подачи ограничивается жесткостью и прочностью механизмов станка и приспособления, а также его мощностью, при чистовой – только требуемой шероховатостью поверхности. В свою очередь скорость резания рассчитывают или выбирают (по нормативной таблице) в зависимости от вида материала, глубины и подачи, свойств режущего инструмента. Затем определяют усилие, крутящий момент и мощность резания. Эти результаты сравнивают с паспортными характеристиками станка и корректируют при необходимости. Нормы времени определяют на основе технико-экономических расчетов.

Типизация технологических процессов базируется на классификации деталей по признаку конструктивного подобия и схожести технологических

процессов их изготовления. Сущность типизации состоит в том, что функционально различные, но сходные по конструктивным и технологическим признакам детали объединяют в группы и изготавливают по единой технологии. Такие детали, которые обладают схожестью формы и размеров и обрабатывают одинаковыми методами, называют типовыми. Для обработки типовых деталей разрабатывают типовые технологические процессы, которые наиболее эффективны для крупносерийного и массового производства деталей.

Типизация технологического процесса дает возможность сократить время подготовки производства, использовать унифицированную технологическую оснастку и поточные методы производства, что ускоряет выпуск новых и модернизацию существующих машин.

В условиях мелкосерийного производства изготовление деталей небольшими партиями сопровождается большими потерями времени из-за переналадки станков при переходе от одной детали к другой. Чтобы снизить потери времени, используют *групповой метод обработки* деталей. При групповой обработке объектом разработки технологического процесса является не отдельная деталь, а их группа. Детали объединяют по возможности их полного изготовления или выполнения отдельных операций по общей единой технологии на одном оборудовании с использованием единой оснастки (и с минимальной переналадкой). Это существенно увеличивает серийность и позволяет создавать поточные линии даже тогда, когда количество деталей каждого вида, входящих в данную группу, невелико.

При разработке технологического процесса из группы деталей выбирают деталь, которая содержит все конструктивные элементы деталей, входящих в данную группу. Для такой детали, которую называют *деталью-представителем* или *комплексной деталью*, разрабатывают типовой технологический процесс, а также выбирают оборудование и оснастку. *Комплексная деталь* – это реальная или искусственно созданная (условная) деталь, содержащая в своей конструкции все основные поверхности, характерные для деталей данной группы.

На рисунке 5.3 представлена схема формирования комплексной детали путем объединения отдельных поверхностей более простых деталей данной группы. Все детали, входящие в эту группу, будут проще комплексной детали. Комплексная деталь служит основой при разработке группового технологического процесса и групповой оснастки. Наладку станочного оборудования производят для комплексной детали, имеющей все основные поверхности, которые встречаются у деталей данной группы. Это позволяет без существенной переналадки обработать любую заготовку детали из этой группы.

Технология изготовления типовых деталей машин.

Напомним, что типовыми деталями называют совокупность деталей, которые обрабатывают одинаковыми методами с использованием однотипных оборудования, приспособлений и инструмента. С учетом типизации технологического процесса детали объединяют в группы по конструктивным признакам.

Технология изготовления валов. Валами считают детали, которые имеют следующее соотношение между длиной l и диаметром d : $l/d \leq 15$.

Валы механических передач машин эксплуатируются в условиях больших нагрузок и частот вращения, что обуславливает высокие требования к качеству обработки валов, в том числе по точности размеров, геометрической форме и взаимному расположению поверхностей.

Валы классифицируют по следующим признакам:

- 1) по конструктивному исполнению – сплошные и полые, гладкие и ступенчатые;
- 2) по назначению – кулачковые и коленчатые;
- 3) по длине – валы 1-й группы – < 150 мм, 2-й – $150-500$ мм, 3-й – $500-1200$ мм, 4-й – > 1200 мм;
- 4) по жесткости – жесткие ($l/d < 10$), нежесткие ($l/d > 10$).

В результате механической обработки состояние валов должно удовлетворять следующим параметрам:

- по точности размеров шеек: рабочих – квалитеты 6–8, нерабочих – квалитеты 9–10;
- по допускам формы шеек: рабочих – $0,01-0,02$ мм, нерабочих – $0,02-0,04$ мм;

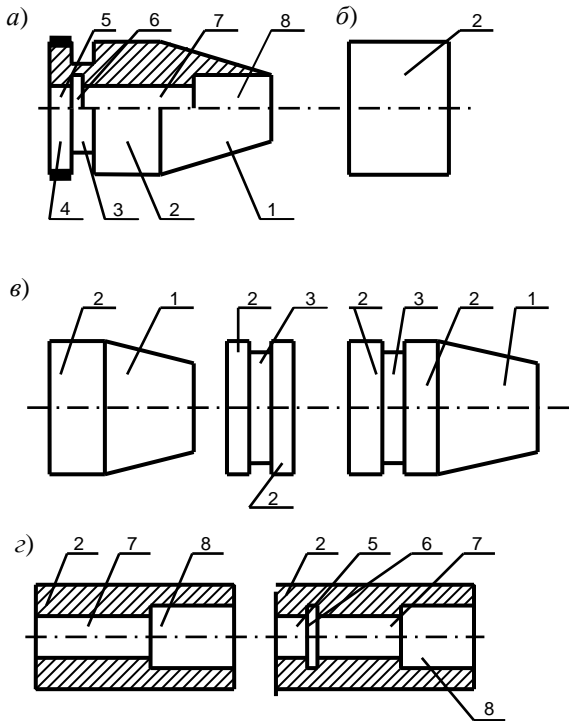


Рисунок 5.3 – Комплексная деталь (а) и детали для групповой обработки (б–2)

– по допускам радиального биения рабочих и нерабочих шеек – 0,02–0,03 мм;

– по допускам торцевого биения – 0,02–0,04 мм;

– по шероховатости поверхности посадочных шеек – $R_a = 1,25 \dots 0,40$ мкм.

Основными материалами для изготовления валов являются углеродистая и легированная конструкционные стали, которые имеют хорошую приработываемость и высокую прочность. В зависимости от условий нагружения используют следующие стали: для малонагруженных валов – Ст3, Ст5 и Ст6, стали 15, 25 и 30; средненагруженных – стали 40, 45 и 50; тяжело-нагруженных – 15X, 25X, 35X, 40X, 45X, 45Г2, 18ГТ.

В качестве заготовок используют прокат сплошного сечения, трубы, поковки, штамповки (иногда отливки).

В большинстве случаев маршрут обработки валов включает:

- обработку торцов заготовки;
- зацентровку заготовки;
- черновое обтачивание;
- предварительное шлифование шеек;
- фрезерование шлицев и шпоночных пазов;
- сверление отверстий;
- нарезание резьбы;
- термическую обработку;
- окончательное шлифование шеек;
- обработку внутренних поверхностей (у полых валов).

В условиях серийного производства для изготовления валов применяют станки с ЧПУ, позволяющие быстро производить переналадку станков.

Технология изготовления втулок и гильз. В машинах применяют бронзовые, латунные, стальные, чугунные и биметаллические втулки, а также чугунные и стальные гильзы. Их изготавливают из прокатных прутков, литых стержней, цельнотянутых труб, полых отливок и биметаллических лент.

В основном они концентричны, т. е. имеют общую ось наружной и внутренней поверхностей и жесткое ограничение равнотолщинности. Их наружные поверхности – обычно цилиндрические (гладкие или ступенчатые) или конические. Очень важно обеспечить концентричность наружных и внутренних поверхностей и перпендикулярность торцов оси детали.

Эта задача решается тремя способами:

- 1) обработка наружной поверхности, отверстия и торцов за один установ;
- 2) первоначальная обработка внутренней поверхности и ее использование в качестве базы при обработке наружной поверхности и торцов, которая производится с установкой детали на оправке;
- 3) первоначальная обработка наружной поверхности и базирование по ней при обработке внутренней поверхности и торцов детали с ее установкой в патроне или приспособлении.

Технология изготовления зубчатых колес. В машинах широко используют цилиндрические, конические и червячные передачи. Цилиндрические передачи используют в приводах машин и механизмов, в частности, в коробках передач, в раздаточных и бортовых редукторах, в гидро- и электро-механических трансмиссиях и др. Конические передачи находят применение в качестве главных передач привода хода дорожных и строительных машин, а также в других передаточных механизмах. Червячные передачи используют в основном в передаточных механизмах рабочих органов дорожных и строительных машин.

Зубчатые передачи ходовых трансмиссий обеспечивают передачу больших мощностей, заданные значения передаточных чисел и достаточную надежность. Их основным преимуществом является наибольший из всех трансмиссий КПД из-за отсутствия потерь энергии, связанных с ее преобразованием. Напомним КПД основных механических передач:

- зубчатой цилиндрической закрытой – 0,97–0,99;
- зубчатой конической закрытой – 0,95–0,98;
- червячной многозаходной закрытой – 0,87–0,92.

Выбор метода обработки зубчатых колес, технологического оборудования, режущего инструмента и вспомогательных приспособлений зависит от многих факторов, в числе которых форма, габариты и материал колеса, форма, расположение и точность зубчатого венца, форма зубьев и модуль зацепления.

Точность зубчатых колес и механических передач нормируют различными показателями, выбор которых зависит от назначения, размера и других факторов. Она регламентирована стандартами от 7-й до 11-й степени. Например, в редукторах общего назначения применяют зубчатые колеса 6–8-й степени точности, в тракторах – 6–8-й, в автотранспортных средствах – 7–9-й и т.д. Требования к ним описаны в ГОСТ 1643–81 «Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски»; ГОСТ 1758–81 «Передачи зубчатые конические. Допуски»; ГОСТ 3675–81 «Передачи червячные. Допуски».

Изготовление зубчатых колес включает следующие основные операции:

- обработку заготовки под нарезание зубьев;
- нарезание, закругление и шевингование зубьев;
- термическую и отделочную обработку.

Обработку зубчатых колес до нарезания зубьев производят с учетом соблюдения концентричности поверхностей и перпендикулярности торцов к оси заготовки в пределах заданных допусков. Выполнение этих требований достигается применением тех же методов, что и при обработке втулок.

Зубчатые колеса изготавливают из углеродистых и легированных сталей, реже – из чугуна и бронзы. Стальные колеса больших диаметров, а также чугунные и бронзовые колеса делают из литых заготовок. Стальные колеса

меньших размеров делают из поковок и штамповок, которые подвергают нормализации или улучшению. Для большинства зубчатых колес используют стали, которые должны обладать прочностью при изгибе, стойкостью к усталостному разрушению и износостойкостью. В зависимости от назначения и условий эксплуатации используют следующие стали:

- углеродистые (40, 45, 50);
- легированные, в том числе хромистые (20X, 35X, 40X 50X);
- хромоникелевые (12ХН3А, 12Х2Н4А, 20ХН);
- хромомарганцевые (18ХГ, 18ХГГ, 25ХГГ, 30ХГГ);
- хромомолибденовые (20ХМ, 30ХМ).

Технология изготовления корпусных деталей. Корпусные детали используют для размещения в них деталей, сборочных единиц и механизмов, а также для обеспечения их заданного положения. По назначению и конструктивным признакам их разделяют на следующие группы деталей:

- коробчатого типа с отверстиями для опор валов (корпусы редукторов, раздаточных коробок, коробок передач и др.);
- с развитыми внутренними цилиндрическими поверхностями (блоки цилиндров, цилиндры двигателей и компрессоров);
- сложной пространственной формы (корпусы насосов и др.);
- кожухи, поддоны, крышки и подобные типы деталей;
- другие корпусные (каретки, салазки, ползуны и т.п.).

Для корпусных деталей характерно наличие привалочных поверхностей, которыми они сопрягаются с другими узлами машины, а также систем отверстий (под подшипники валов, установочные штифты и крепежные детали), точно координированных между собой и относительно привалочных поверхностей. Эта координация необходима для обеспечения нормального монтажа взаимосвязанных узлов машины. Поэтому особое внимание при обработке корпусных деталей уделяют обеспечению в пределах установленных допусков межосевых расстояний; параллельности и перпендикулярности осей основных отверстий друг к другу и привалочным плоскостям; размерам и геометрической форме всех отверстий и перпендикулярности их торцов осей; соосности отверстий для подшипников каждого вала. Так, в результате механической обработки состояние корпусных деталей должно удовлетворять ряду требований:

- точность диаметров основных отверстий под подшипники – по качеству 7 (реже по 6 и 8);
- точность межосевых расстояний отверстий – от ± 25 до ± 280 мкм;
- допуск круглости – $\leq 0,25 \dots 0,50$ поля допуска на диаметр;
- допуск соосности отверстий под подшипники – $\leq 0,5$ допуска на диаметр меньшего отверстия;
- допуск параллельности осей отверстий – $0,02-0,05$ мм на 100 мм длины;

– допуск перпендикулярности торцевых поверхностей к осям отверстий – 0,01–0,10 мм на 100 мм радиуса и др.

Корпусные детали изготавливают из чугунных или стальных отливок, иногда из алюминиевых отливок и сварных конструкций. Из серого чугуна марок СЧ15, СЧ20, СЧ25 получают заготовки корпусных деталей машин, которые работают на износ. Заготовки корпусных деталей, эксплуатирующихся в условиях вибраций и ударных нагрузок, выполняют из ковкого чугуна или стали. Для сварных корпусных деталей применяют малоуглеродистые стали Ст3 и Ст4.

Механическая обработка корпусных деталей начинается с основных базовых поверхностей, затем взаимосвязанных плоских поверхностей, параллельных и перпендикулярных базовым поверхностям, далее обработка основных и крепежных отверстий с их последующей отделочной обработкой.

5.4 Обеспечение точности размеров и качества поверхности деталей при механической обработке

Точность является одним из основных факторов, определяющих работоспособность детали в составе сборочной единицы или агрегата. Под ***точностью размеров детали*** понимают степень их приближения к теоретическим или номинальным показателям. Количественной характеристикой точности механической обработки является **погрешность**, т.е. отклонение реального геометрического показателя от теоретического.

Как правило, для машиностроительной продукции требования к точности деталей при их изготовлении опираются на нормирование точности ее элементов (при их изготовлении или ремонте). В результате механической обработки деталей возникают погрешности их линейных размеров и геометрической формы, а также погрешности в относительном расположении осей и поверхностей элементов деталей. Эти погрешности оказывают существенное влияние на работоспособность узлов и агрегатов машин, вызывая динамические нагрузки, вибрации и шум.

В общем случае после механической обработки детали должны обладать точностью:

- размера;
- формы поверхности;
- относительного расположения элементов поверхности;
- шероховатости поверхности.

Действительный размер каждого элемента детали должен находиться в заданных пределах, зависящих от назначения детали и сборочной единицы в целом. Нормирование точности размера состоит в указании допускаемых отклонений реальных размеров от заданных (номинальных или идеальных).

Действительная геометрическая форма детали или ее элементов (плоскости, цилиндра, конуса и др.) также должна иметь параметры, которые отличаются от номинальных только в заданных пределах. Нормирование точности состоит в указании допустимых значений искажения реальной формы по отношению к номинальной, заданной в чертежах.

Действительное расположение элементов детали принимают с учетом выполнения поверхностями детали требуемых функций и допускаемых при этом отклонений поверхностей и осей детали от их заданного (в проектно-конструкторской документации) взаимного расположения.

Нормирование точности формы детали и расположения ее поверхностей состоит в оценке величины отклонений, которые определяют по отношению либо к прилегающей поверхности (плоскости, цилиндра), либо к прилегающей линии (прямой, окружности и т.п.) – в сечениях.

Указанные параметры по-разному влияют на эксплуатационные характеристики сборочных единиц. Так, точность размера элементов детали в основном оказывает влияние на точность ее сопряжения или соединения с другими деталями, точность формы – на характер и работоспособность сопряжения или соединения, точность расположения – на точность сборки и расположения деталей в сборочной единице (агрегате или механизме).

Действительная шероховатость поверхности после механической обработки также регламентирована в зависимости от многих факторов, в том числе назначения детали, требований к чистоте поверхности и др. Нормирование шероховатости состоит в указании степени допускаемых отклонений реальной шероховатости от идеальной.

Обеспечение точности размеров деталей. Точность изготовления детали должна соответствовать требованиям рабочих чертежей. Она зависит от точности:

- станка и приспособлений, на которых производится обработка;
- изготовления и установки режущего инструмента, степени его износа и нагрева;
- измерительного инструмента и промеров.

Станки не могут быть абсолютно точными и одинаковыми. В зависимости от класса точности станка (и соответствующих допусков) могут иметь место биение шпинделей, непрямолинейность направляющих, неперпендикулярность осей шпинделей рабочим поверхностям столов, зазоры в сочленениях. Из-за этого появляются погрешности в размерах обрабатываемых заготовок и деталей, а также конусность, овальность, седлообразность и бочкообразность цилиндрических поверхностей, смещение и непараллельность осей, непараллельность плоскостей. По мере износа и нагрева в узлах трения эти погрешности возрастают.

Режущий инструмент также изготавливают с заданной степенью точности, к этому нужно добавить точность его установки, нагрев и износ, что в совокупности может быть источником погрешностей.

Поэтому для обеспечения точности на этапе разработки проектно-конструкторской документации намечают базовые поверхности или другие элементы деталей (базы), которые используют не только при изготовлении деталей, но и при сборке агрегатов и машины, а также при ремонте деталей и узлов. В общем случае *базированием* называют ориентацию заготовки или детали относительно выбранной системы координат. Правильный выбор баз является одним из необходимых условий надежной работы машины. По *назначению* различают конструкторские (основные и вспомогательные), технологические и измерительные базы.

Конструкторская база – это, как правило, поверхность детали, относительно которой определяют на чертеже положения других деталей или сборочных единиц машины, а также других поверхностей данной детали. Таким образом, конструкторская база служит для определения положения детали или сборочной единицы в машине.

Основной назначают конструкторскую базу, которую используют для определения положения детали (сборочной единицы) в машине. *Вспомогательную* конструкторскую базу применяют для определения положения присоединяемой детали относительно данной детали.

Технологическая база – это поверхность заготовки (или детали), которую используют для ее установки и закрепления в необходимом положении при механической обработке (при изготовлении или ремонте). Для этого заготовку лишают всех шести степеней свободы, используя установочную, направляющую и опорную базы.

Установочная база лишает заготовку трех степеней свободы (перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг двух других); *направляющая* – двух степеней свободы (перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг другой оси); *опорная* – одной степени свободы (перемещения вдоль одной координатной оси).

Выбор технологических баз должен быть продиктован принципом однозначности положения заготовки в пространстве. Например, если заготовка обладает достаточной жесткостью во всех направлениях, то можно использовать сочетание установочной (ограничивающей три из шести возможных перемещений – два угловых и одно линейное), направляющей (ограничивающей угловое и линейное перемещение) и опорной (ограничивающей одно линейное перемещение) баз. Могут быть использованы и другие сочетания, в которые входят двойная опорная или двойная направляющая база. При этом должно быть принято во внимание направление сил резания, тяжести и трения, т. е. обеспечение ими силового замыкания и однозначности положения заготовки. В случае недостаточной жесткости в каком-либо из направлений или на каком-либо участке детали предусматривают избыточное базирование.

Технологическими базами могут быть плоские, внутренние и наружные цилиндрические поверхности, торцевые и другие поверхности (например,

конструктивных элементов, которые определяют положение детали в машине, а также специально создаваемых технологических элементов – центровых гнезд валов, центрирующих поясков и др.). Для выполнения первых операций и переходов при обработке заготовки могут быть использованы *черновые базы* (т.е. необработанные поверхности).

Технологические базы выбирают на основании рабочего чертежа заготовки или детали, а также технических условий на заготовку или деталь. Отклонение фактического положения заготовки при базировании от требуемого называют *погрешностью базирования*.

Для обеспечения заданной точности механической обработки заготовки или детали, помимо технологических баз, выбирают измерительные базы. Измерительная база – это поверхность заготовки (или детали), которую используют для определения ее относительного положения и измерения размеров при обработке. Выбор измерительной базы не должен приводить к дополнительным погрешностям измерения, вызванным формой и расположением базы. В качестве измерительных баз нередко используют функциональные элементы или вводят дополнительные элементы для контроля размеров.

При совмещении технологической, конструкторской и измерительной баз заготовку обрабатывают по размерам, проставленным в рабочем чертеже, с использованием конструкторского допуска на размер. Совмещение различных баз и назначение для установки заготовки и ее измерения одних и тех же поверхностей обеспечивает достижение высокой точности обработки заготовки. В противном случае, т.е. при несовпадении баз, возникают погрешности базирования.

Погрешность базирования, т.е. отклонение размера детали, может возникнуть, например, из-за несовпадения технологической и измерительной баз. Это происходит из-за того, что расстояния от измерительной базы до рабочего инструмента, установленного заданным образом для обработки

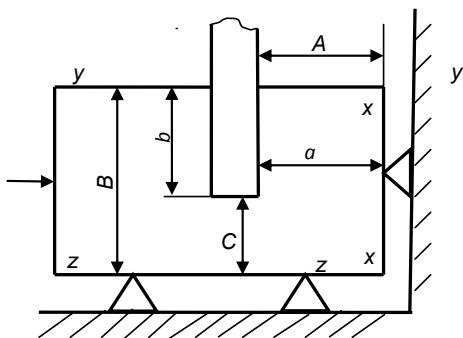


Рисунок 5.4 – Схема фрезерования паза

заготовки, при различных фактических размерах заготовки (в пределах допуска на ее изготовление) получаются разными. Классическим примером может служить заготовка для фрезерования паза (рисунок 5.4). Фреза настроена на постоянные размеры A и C . При этом плоскости $x-x$ и $z-z$ являются технологическими базами. Для размера a измерительной базой является плоскость $x-x$, т.е. для этого

размера технологическая и измерительная базы совпадают, следовательно, размер a будет выдержан без погрешностей базирования (колебания размеров возможны, но за счет других факторов). Для размера b измерительной базой будет плоскость $y-y$, поэтому этот размер будет зависеть от действительного размера детали B , который может отличаться в пределах допуска (на некоторую величину) на этот размер, установленный для заготовки.

Соответственно, размер b (при $C = \text{const}$) также будет иметь погрешность на эту же величину. Таким образом, здесь имеет место именно погрешность базирования, когда измерительная база (плоскость $y-y$) не совпадает с технологической (плоскостью $z-z$).

Если технологические базы не совпадают с конструкторскими или измерительными базами, для устранения погрешности базирования в рабочих чертежах заменяют размеры от конструкторских или измерительных баз на размеры непосредственно от технологических баз. Результатом является удлинение размерных цепей, перераспределение поля допусков на исходные размеры, установленные от конструкторских баз, а также снижение производительности и удорожание процесса обработки.

Таким образом, применение *принципа совмещения* (или *единства*) баз, а именно использование в качестве технологических баз поверхностей, которые являются одновременно конструкторскими и измерительными базами детали, а также базами при сборке агрегатов, значительно упрощает достижение требуемой точности размеров при обработке заготовки.

Для повышения точности базирования применяют также *принцип постоянства баз*. Наличие постоянных технологических баз обеспечивает надежное закрепление детали и неизменность ее положения при механической обработке. Смена баз в ходе технологического процесса снижает точность обработки из-за увеличения погрешности взаимного расположения новых и старых технологических баз. Соответственно, наибольшая точность механической обработки заготовки или детали обеспечивается при соблюдении принципов единства и постоянства баз.

Суммарная погрешность механической обработки зависит от первичных погрешностей, возникающих в результате действия каждого из факторов, влияющих на точность обработки. Все погрешности по характеру проявления подразделяют на систематические и случайные.

К *систематическим* можно отнести погрешности:

- связанные с настройкой станка;
- вызванные температурной деформацией станка;
- обусловленные размерным износом инструмента.

Систематические погрешности можно выявить промером нескольких обработанных деталей, а некоторые из них – определить аналитически. Это дает возможность их устранить или компенсировать.

Случайные погрешности – это погрешности, момент возникновения которых, величину и направление невозможно определить заранее или спрогнозировать. К ним относятся погрешности от упругих деформаций (в системе СПИД: станок – приспособление – инструмент – деталь), от нестабильности установки детали на станке и других факторов.

При изготовлении партии одинаковых деталей на одном и том же оборудовании (одним и тем же специалистом) действительные размеры детали в результате действия случайных факторов распределяются в пределах

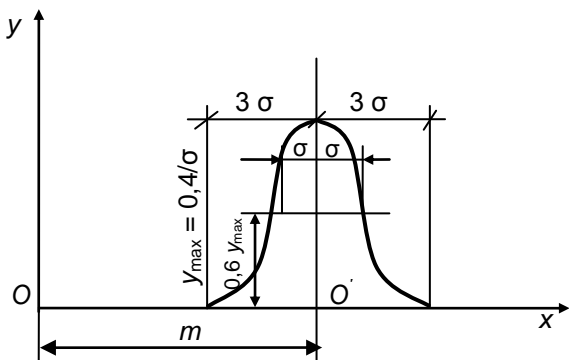


Рисунок 5.5 – Кривая нормального распределения фактических размеров детали

некоторой амплитуды погрешности, оценку которой производят методами математической статистики и теории вероятности. Кривая нормального распределения фактических размеров деталей выглядит, как показано на рисунке 5.5.

На упомянутом рисунке приняты традиционные обозначения: x – размер детали; y – функция плотности размеров;

$m(x)$ – математическое ожидание (среднее арифметическое размера),

$$m = \sum_{i=1}^N P_i x_i ,$$

где P_i – вероятность появления x_i ; x_i – значение случайной величины;

$\sigma(x)$ – среднее квадратическое отклонение,

$$\sigma = \sqrt{D} ;$$

$D(x)$ – дисперсия случайной величины;

$$D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2 ;$$

N – число деталей.

Распределение действительного размера деталей, при обработке которых действует большое число случайных факторов, удовлетворительно описывается нормальным законом распределения. При этом положение центра группирования (точка O') определяется качеством настройки станка и инструмента, а степень рассеивания фактических размеров – техническим состоянием оборудования. Знание параметров распределения размера детали в

результате обработки позволяет определять вероятность появления брака, осуществлять статистическое регулирование технологического процесса. Естественно, это возможно при изготовлении больших партий деталей на предварительно настроенных станках. При этом используют стандартизированные методы: метод средних арифметических значений и размахов, метод медиан и индивидуальных значений. Но в условиях единичного и мелкосерийного производства заданная точность размеров достигается методом пробных рабочих ходов.

Форма кривой распределения размеров зависит от вида и стадии механической обработки детали. Чем выше точность обработки, тем меньше среднеквадратические отклонение σ . В качестве примера на рисунке 5.6 приведены кривые распределения диаметров цилиндрического отверстия деталей на различных стадиях его обработки, начиная от исходных заготовок (кривая σ), затем последовательно после предварительной (σ_1), чистовой (σ_2) и окончательной (σ_3) обработки.

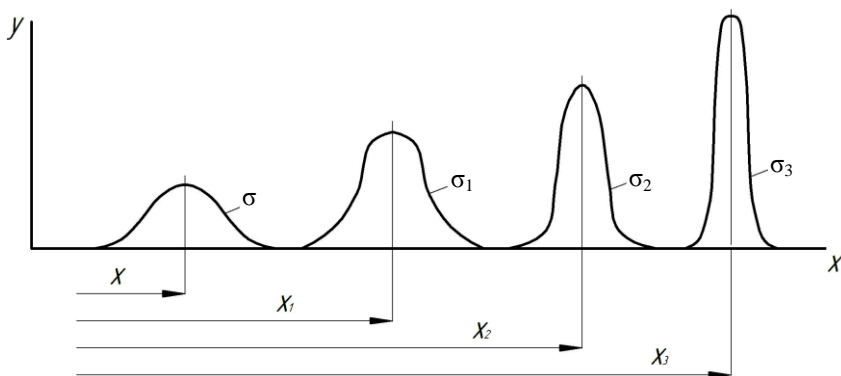


Рисунок 5.6 – Кривые нормального распределения диаметров отверстий деталей в зависимости от стадии обработки:

σ – исходных заготовок; σ_1 – после предварительной обработки (точения); σ_2 – после чистовой обработки; σ_3 – после окончательной обработки (шлифования)

Как видно из рисунка, поле рассеяния размеров уменьшается от предварительной обработки точением (кривая σ) до окончательной обработки шлифованием (кривая σ_3). При этом среднее арифметическое отклонение

$$m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (5.2)$$

где n – число произведенных измерений.

Геометрическая форма детали или ее элементов (цилиндра, конуса, плоскости и др.) после механической обработки также не может быть безупречной. Нормирование ее точности зависит от назначения детали и сборочной единицы и состоит в указании параметров, характеризующих отклонения реальной формы от идеальной.

Многообразие деталей машин и механизмов сводится к довольно простым геометрическим формам их элементов. Об этом свидетельствуют такие цифры: подавляющее большинство элементов деталей ($\approx 70\%$) – это цилиндрические поверхности, значительно меньшее количество элементов (около 12%) имеют плоские поверхности. На долю более сложных корпусных деталей приходится всего 4% , а на долю зубчатых колес – не более 3% . Соответственно, наибольшее внимание при анализе отклонений формы уделяют цилиндрическим и плоским поверхностям элементов деталей машин.

Несоответствие реальной формы детали после механической обработки форме, заданной на этапе проектирования и конструирования, влияет на работоспособность детали в соединениях и сопряжениях, ухудшая эксплуатационные свойства сборочных единиц и машины в целом. Для оценки допускаемых искажений формы используют параметр, который называют отклонением формы.

Отклонение формы – это отклонение формы реальной поверхности от формы номинальной (идеальной) поверхности. Номинальной поверхностью считают поверхность, форма которой задана чертежом.

Допуск формы – это наибольшее допускаемое значение отклонения формы.

В международных и отечественных стандартах нормируется пять видов отклонений формы:

- от плоскостности;
- от прямолинейности;
- от цилиндричности;
- от круглости;
- профиля продольного сечения.

Два первых отклонения относятся к плоским поверхностям, остальные – к цилиндрическим. Например, *отклонением от плоскостности* считают наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающей плоскости; *отклонением от круглости* – наибольшее расстояние от точек реального профиля до прилегающей окружности и т.п.

В таблице 5.3 представлены указанные виды отклонений, а также обозначения допусков этих отклонений на чертежах.

Таблица 5.3 – Виды отклонений формы и расположения поверхностей

Группа отклонений	Вид отклонения	Условный знак допуска
Отклонения формы	От прямолинейности	
	От плоскостности	
	От круглости	
	От цилиндричности	
	Профиля поперечного сечения	
Отклонения расположения	От параллельности	
	От перпендикулярности	
	Наклона	
	От соосности	
	От симметричности	
	Позиционное	
	От пересечения осей	
Суммарные отклонения формы и расположения	Радиальное биение	
	Торцевое биение	
	Биение в заданном направлении	
	Полное радиальное биение	
	Полное торцевое биение	
	Отклонение формы заданного профиля	
Отклонение формы заданной поверхности		

Если на чертеже нет указаний по отклонениям формы, следовательно, это отклонение лежит в пределах поля допуска на размер. Если же величина отклонения формы должна быть меньше значения допуска на размер, на чертеже следует сделать соответствующее указание. Как правило, это указание делается при помощи условного знака вида отклонения (см. таблицу 5.3) и числового значения допуска.

При механической обработке (из-за неверного выбора подачи, износа режущего инструмента, отклонений от соосности центров и др.) могут возникнуть такие отклонения профиля продольного сечения, как бочкообразность, конусообразность и седлообразность.

В качестве примера на рисунке 5.7 показана схема деформации детали от усилия резания (при обработке вала в центрах точением), в результате которой обработанная поверхность приобретает бочкообразный вид.

В корпусных деталях посадочные отверстия под подшипники и торцевые поверхности валов и корпусов должны быть тщательно обработаны, поскольку отклонения формы посадочных отверстий корпуса и вала могут передаваться на поверхности качения подшипников, что способствует их искажению и приводит к повышенному уровню вибрации и изнашиванию.

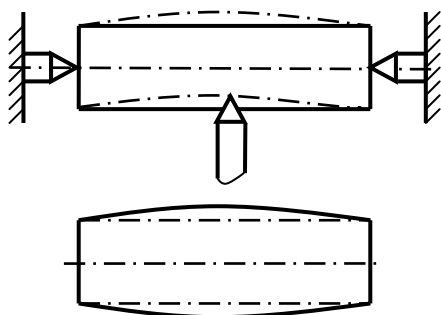


Рисунок 5.7 – Схема деформации детали от усилия резания

О значительном влиянии точности формы деталей на эксплуатационные характеристики сборочных единиц и сопряжений свидетельствуют следующие цифры: уменьшение конусообразности, седлообразности и овальности шеек коленчатого вала с 0,01 до 0,006 мм позволяет увеличить срок работы вкладышей подшипников в 2,5–4,0 раза.

Относительное расположение элементов поверхности де-

тали. Помимо отклонений формы детали, погрешности ее механической обработки влияют также на расположение поверхностей элементов, составляющих данную деталь. Для нормирования требований к точности расположения поверхностей элементов детали используют такой параметр, как *отклонение расположения* элементов детали. Причинами возникновения этих отклонений могут быть погрешности обработки деталей, погрешности приспособлений для установки деталей при обработке, погрешности, возникающие при нарушении принципа единства баз при изготовлении деталей, и др. При эксплуатации деталей эти отклонения могут возрасти из-за пластических деформаций и неравномерного износа рабочих поверхностей, а также коробления корпусных деталей.

Отклонение расположения – это отклонение реального расположения рассматриваемого элемента детали от номинального.

Допуском расположения называют предельное допускаемое значение соответствующего отклонения расположения поверхностей детали.

Для оценки точности расположения поверхностей, как правило, используют *базу*, т.е. элемент детали, по отношению к которому задают допуск расположения рассматриваемого элемента, а также определяют соответствующее отклонение. Базой может быть плоскость, ось, плоскость симметрии. В ряде случаев используют комплект баз – совокупность двух или трех баз, образующих систему координат. Как правило, базовая поверхность является наиболее значимой для обеспечения эксплуатационных характеристик детали.

В международных и отечественных стандартах для нормирования требований к точности расположения используют следующие *виды отклонений* (см. таблицу 5.3):

- от параллельности;
- от перпендикулярности;
- наклона;

- от соосности;
- от симметричности;
- позиционное;
- от пересечения осей.

На чертежах в основном используют следующие отклонения : *от параллельности* (для плоскостей, т.е. разность между наибольшим и наименьшим расстояниями между плоскостями в пределах нормируемого участка); *от перпендикулярности* (для плоскости относительно оси); *от соосности* (для оси поверхности вращения рассматриваемого элемента относительно оси базовой поверхности или относительно общей оси детали); *от симметричности* (для плоскости симметрии рассматриваемого элемента относительно плоскости симметрии базового элемента в пределах нормируемого участка).

Особенно ответственной задачей является обеспечение требований по точности расположения поверхностей корпусов двигателей, насосов, редукторов и других агрегатов приводов машин. При этом если корпусные детали составляют всего 4 % от всех деталей в машиностроительном производстве, то их стоимость достигает 40 % стоимости всего производства. Поэтому выполнение этих требований сопряжено не только с техническими трудностями при их изготовлении и сборке, но и с большими экономическими затратами. Например, в коробках передач, редукторах и других корпусных агрегатах важную роль играют посадочные поверхности корпусов, поскольку при установке подшипников качения из-за податливости их колец часто происходит копирование формы посадочных поверхностей валов и корпусов. Перекос колец могут вызвать отклонения от соосности посадочных поверхностей вала и корпуса; отклонения от перпендикулярности базовых торцов вала и корпуса, а также деформации вала и корпуса в работающем узле. Чтобы ограничить указанные отклонения, на чертежах задают допуски расположения посадочных поверхностей вала и корпуса.

В ряде случаев точность формы и точность расположения поверхностей оказывают совместное воздействие на эксплуатационные характеристики поверхностей элементов деталей, которое невозможно разделить. Поэтому для оценки совместного проявления отклонений формы и расположения поверхностей используют *суммарные отклонения*. К суммарным отклонениям формы и расположения поверхностей относятся (см. таблицу 5.3):

- радиальное и торцевое биение, а также биение в заданном направлении;
- полное радиальное и торцевое биение;
- отклонение формы заданного профиля;
- отклонение формы заданной поверхности.

Суммарные отклонения формы и расположения поверхностей весьма негативно влияют на работоспособность и надежность работы машин, вызывая в деталях и сборочных единицах динамические и статические нагрузки

ки, которые способствуют ускоренному усталостному разрушению и увеличенному износу деталей в сопряжениях.

На чертежах чаще всего используют радиальное и торцевое биения, которые являются комплексными характеристиками ряда отклонений формы и расположения поверхностей.

Перечисленные виды отклонений формы и расположения поверхностей и профилей (включая комплексные) ограничены величинами соответствующих допусков. Числовые значения допусков регламентированы ГОСТ 24643–81 и заданы в виде рядов (степеней) точности. Допуски назначают в зависимости от номинальных размеров элементов детали (например, диаметра или длины участка). Установлено 16 степеней точности. Самая точная из них первая. Значение допуска увеличивается в геометрической прогрессии со знаменателем 1,6 при переходе из одной степени точности в другую.

Обеспечение качества поверхности деталей. Качество поверхности характеризуют совокупность геометрических и физико-механических параметров, а также структура поверхностных слоев деталей.

К геометрическим параметрам относят шероховатость, волнистость, а также направление штрихов обработки.

Шероховатость – это совокупность периодических неровностей с относительно малым шагом (т. е. это микрорельеф поверхности на малой базовой длине, на которой исключаются отклонения формы и волнистость).

Для практического нормирования в основном используют шесть параметров шероховатости, которые характеризуют как высоту поверхностных неровностей, так и линейные показатели этих неровностей.

К *вертикальным параметрам* относятся:

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой длины (это основной параметр шероховатости, назначаемый на все обработанные поверхности, он нормируется значениями от 0,008 до 100 мкм);

R_z – высота неровностей профиля, которую определяют по десяти точкам; это сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины (этот параметр назначают в основном на поверхности, полученные литьем, ковкой, чеканкой, он нормируется значениями от 0,025 до 1600 мкм).

Параметры R_a и R_z характеризуют усредненную высоту поверхностных неровностей, однако, как правило, значения одного параметра не переводят в значения другого. Для сопоставления порядка их величин принимают следующие соотношения:

– для регулярных неровностей $R_z = 4R_a$;

– для нерегулярных $R_z = (6 \dots 12)R_a$;

R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля, т.е. расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины (параметр нормируется значениями от 0,025 до 1600 мкм, как и R_z).

К *горизонтальным параметрам* относятся:

S_m – средний шаг неровностей профиля, т.е. среднее значение отрезков средней линии профиля, содержащего неровности профиля в пределах базовой длины (параметр нормируют значениями от 0,002 до 12,5 мм);

S – средний шаг местных выступов профиля, т.е. среднее значение отрезков средней линии между проекциями на нее наивысших точек соседних местных выступов профиля в пределах базовой длины (параметр нормируют значениями от 0,002 до 12,5 мм);

t_p – относительная опорная длина профиля (параметр нормируют в процентах от R_{\max} из ряда от 5 до 90 %).

Измерение шероховатости производят с помощью профилографов и профилометров, а также косвенных методов оценки. Ее величина зависит от метода и режима обработки, геометрии и состояния режущего инструмента, физико-механических свойств обрабатываемого материала и других факторов. Для каждого метода обработки имеется свой диапазон получаемой шероховатости. В свою очередь шероховатость оказывает значительное влияние на работоспособность и надежность соединений, узлов трения и систем, связанных с относительными перемещениями сопрягаемых элементов машин.

Наибольшее влияние на шероховатость оказывают скорость резания и величина подачи. С увеличением скорости параметр R_z сначала возрастает (из-за образования на лезвиях инструмента при обработке пластичных материалов так называемых наростов), а потом снижается до стабильных значений (рисунок 5.8). Нарост представляет собой слоистое образование, форма и размеры которого зависят от скорости резания, физико-механических характеристик материала детали и др. Диапазон скоростей, при которых образуется нарост, составляет от 10–12 до 50–70 мм/мин.

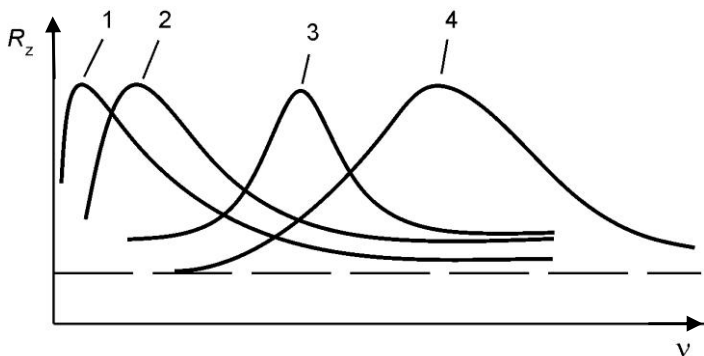


Рисунок 5.8 – Влияние скорости резания на шероховатость обработанной поверхности различных материалов:

1 – медь; 2 – углеродистая сталь; 3 – легированная сталь; 4 – пластмасса

Точка экстремума ($R_z = \max$) смещается влево с увеличением теплопроводности обрабатываемого материала. При больших скоростях резания наросты не образуются и шероховатость зависит в основном от геометрических характеристик режущего инструмента. Кроме того, шероховатость изменяется под влиянием величины подачи при резании: она снижается при уменьшении подачи. Эти данные свидетельствуют о том, что при правильном выборе метода обработки можно обеспечить требуемые геометрические характеристики поверхностей.

Физико-механические свойства материалов, в частности их поверхностного слоя, определяются природой материала, его термической и химико-термической обработкой. Кроме того, свойства поверхностного слоя зависят от силовых и термических воздействий в процессе механической обработки.

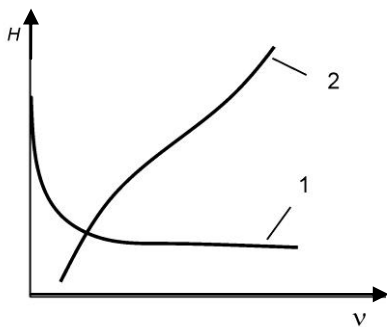
Они вызывают два основных процесса:

- 1) *упрочнение (наклеп)* в результате силового воздействия резания;
- 2) *разупрочнение* (снятие наклепа) в результате нагрева.

Таким образом, на поверхностные слои материала детали одновременно действуют силовое и тепловое воздействия, которые вызывают их упрочнение или разупрочнение в зависимости от превалирования того или иного воздействия.

При обработке режущим инструментом его силовое воздействие приводит к пластической деформации поверхностных слоев металла, которая сопровождается искажением его кристаллической решетки и возникновением больших внутренних напряжений (в основном напряжений сжатия). В результате поверхностный слой приобретает повышенные физико-механические характеристики.

Толщина упрочненного слоя и степень упрочнения зависят от метода и режимов обработки, а также от геометрических параметров режущего инструмента.



На рисунке 5.9 показано влияние скорости резания на твердость поверхностных слоев различных сталей. Эти кривые дают информацию о взаимосвязи структуры и прочностных свойств поверхностных слоев стали при механической обработке. Если в сплаве при механической обработке не происходит структурных превращений, то увеличение скорости резания снижает твердость поверхностного слоя из-за нагрева обрабатываемой поверхности (кривая 1), т.е.

Рисунок 5.9 – Влияние скорости резания при точении на твердость стали:
1 – 30ХГС; 2 – У10

эффекта упрочнения не происходит. Если же с ростом скорости обработки в стали происходят структурные превращения из-за поверхностной закалки, то твердость упрочненного слоя при этом возрастает (кривая 2).

С увеличением глубины резания и подачи толщина наклепанного слоя также возрастает, однако при малых подачах и глубинах, а также при обработке абразивным инструментом могут возникнуть напряжения растяжения (в результате нагрева), которые разупрочняют поверхностные слои.

Подбирая способы обработки, режимы резания и охлаждения, а также геометрию режущего инструмента, можно направленно влиять на эти процессы. Как правило, создают наклеп для повышения усталостной прочности, износостойкости и коррозионной стойкости поверхностных слоев.

В таблице 5.4 приведены характеристики наклепанных слоев при различных методах механической обработки стальных деталей.

Таблица 5.4 – Характеристики наклепа в зависимости от метода обработки

Вид обработки	Характеристики слоя	
	Степень упрочнения*	Толщина, мкм
Точение	2,2–2,5	30–50
Тонкое точение	2,4–2,8	20–60
Фрезерование торцовое	2,4–2,6	40–100
Фрезерование цилиндрическое	2,2–2,4	40–80
Сверление	2,6–2,7	180–200
Протягивание	2,5–3,0	120–150
Шлифование	2,4–2,6	30–60
Притирка	2,1–2,2	3–7

* Степень упрочнения – это отношение твердости наклепанного слоя к твердости исходного металла.

Как видно из таблицы 5.4, метод механической обработки оказывает значительное влияние только на толщину наклепанных слоев (в пределах от 3 до 200 мкм). При этом степень упрочнения поверхностных слоев обработанных деталей меняется незначительно – в интервале от 2,1 до 3,0 единиц.

5.5 Термическая, химико-термическая и термомеханическая обработка деталей

Современные методы повышения прочности металлов и сплавов основаны на создании такой структуры материала, которая обеспечивает максимальную блокировку дислокаций в виде границ зерен, субзерен и дисперсных частиц вторичных структур. Значительный вклад в упрочнение вносят атомы внедрения (С, О, Н, N), которые блокируют дислокации, скапливаясь на них. При этом необходимо сочетание эффективного торможения дислокаций с их ограниченной подвижностью у барьеров, чтобы повышение прочностных характеристик сопровождалось высоким сопротивлением хрупкому разрушению.

К методам упрочнения относятся (помимо собственно легирования) термическая, химико-термическая и термомеханическая обработка, а также пластическое деформирование.

Термическая обработка (ТО) является самым простым, распространенным и достаточно эффективным методом упрочнения, влияющим на структуру и свойства поверхностных слоев металлических, в том числе стальных, деталей.

Главными факторами ТО являются температура нагрева, время выдержки при этой температуре и скорость охлаждения.

Для нагрева деталей используют два основных способа: во-первых, *конвективный*, когда передача теплоты детали производится от источника через теплоноситель (воздух, природный газ и др.) в печах различных конструкций и размеров; во-вторых, *индукционный*, когда тепло генерируется в самой детали за счет переменного электромагнитного поля, которое наводит индуктор.

К основным методам термообработки стальных деталей относятся отжиг, нормализация, закалка, отпуск и обработка холодом, которые имеют различное назначение.

Отжиг – это метод термообработки, который состоит из нагрева стальной детали до заданной температуры (выше температуры фазовых превращений), выдержки и последующего медленного охлаждения (в печи). Различают *полный, неполный, диффузионный, рекристаллизационный и отжиг для снятия остаточных напряжений.*

Отжиг проводят в основном для улучшения обрабатываемости стали, снижения хрупкости и увеличения пластичности, а также для снятия внутренних напряжений.

Н о р м а л и з а ц и я – это метод термообработки, который также включает нагрев стальной детали до заданной температуры (выше температуры фазовых превращений), выдержку при этой температуре и охлаждение на воздухе. При этом скорость охлаждения при нормализации выше, чем при отжиге. Нормализацию осуществляют для улучшения обрабатываемости стали, а также для подготовки детали к закалке.

О т п у с к – это метод термообработки, состоящий в нагреве закаленной детали до температур в интервале 150–650 °С (но не выше 727 °С), выдержке при этой температуре и охлаждении с любой скоростью. Отпуск проводят в основном для снижения внутренних напряжений, возникающих при закалке, снижения хрупкости и увеличения вязкости закаленных сталей.

З а к а л к а – это самый распространенный метод термообработки, который включает нагрев стальной детали до заданной температуры (выше температуры фазовых превращений), выдержку при этой температуре и после-

дующее быстрое охлаждение. Закалку проводят для повышения прочности, твердости и износостойкости стали. Однако при этом снижается их пластичность и увеличивается хрупкость. Различают объемную и поверхностную закалку.

Объемная закалка – основной вид упрочняющей термической обработки конструкционных сталей. Поскольку в процессе закалки стали ее структура становится резко неравновесной и возникают большие остаточные напряжения, после закалки обычно следует отпуск стали, позволяющий улучшить ее свойства. Главным отличием закалки от других операций термической обработки является высокая скорость охлаждения, достигаемая применением специальных закалочных сред.

Выбор закалочной среды – один из главных факторов правильной закалки. Он осложняется тем, что закалочная среда должна обеспечивать неодинаковые скорости охлаждения при различных температурах. Наиболее высокая скорость охлаждения должна быть в интервале температур 650–400 °С. В диапазоне температур мартенситного превращения скорость охлаждения должна быть невысокой, что предотвращает возникновение термических напряжений, способствующих образованию трещин, и в то же время не слишком низкой, чтобы не произошли отпуск мартенсита и стабилизация остаточного аустенита.

В качестве закалочных сред обычно используют жидкости, но для некоторых легированных сталей необходимая скорость охлаждения обеспечивается применением спокойного или сжатого воздуха. В связи с особенностями теплообмена при контакте нагретого металла с жидкостью интенсивность теплоотвода, а также скорость охлаждения зависят от температуры металла. Это связано с тем, что при очень высоких температурах на поверхности образуется сплошная паровая рубашка, которая препятствует отводу тепла. По мере снижения температуры эта рубашка прорывается, и теплоотвод идет очень интенсивно (стадия пузырькового кипения). Ниже температуры кипения теплота отводится за счет конвекции жидкости, и интенсивность этого процесса снова резко снижается. Интервалы наиболее интенсивного теплоотвода различных жидкостей существенно различаются (таблица 5.5), поэтому при выборе закалочной среды необходимо учитывать конструктивные особенности деталей.

В частности, воду с температурой 18–25 °С используют в основном при закалке деталей простой формы и небольших размеров, выполненных из углеродистой стали. Детали сложной формы из углеродистых и легированных сталей закаляют в маслах. Для закалки легированных сталей наряду с маслами часто используют водные растворы NaCl и NaOH с наиболее высокой охлаждающей способностью. Кроме того, для этих целей довольно ши-

роко применяют водные растворы поверхностно-активных веществ и синтетических полимеров. Объемная закалка повышает прочность сталей: углеродистых – в 1,5–2,0 раза, легированных – в 2,0–3,0 раза, твердость – до 40–55 HRC (по Роквеллу). Ее используют для упрочнения отливок, поковок, штамповок, проката и сварных швов.

В ряде случаев используют *закалку холодом*, которая состоит в дополнительном охлаждении закаленной стальной детали при отрицательных температурах (–40...–100 °С). В результате повышается твердость и снижается хрупкость стальных деталей.

Поверхностная закалка. Ее особенность состоит в том, что упрочняется только неглубокий (толщиной от 0,2 до 15,0 мм) поверхностный слой материала деталей, а сердцевина остается вязкой и пластичной. Такое сочетание обеспечивает повышение износостойкости (в 2 раза) и ударной прочности.

Если детали испытывают усталостное изнашивание, ограничиваются толщиной упрочненного слоя до 3 мм, если же их эксплуатируют при высоких контактных нагрузках, толщину увеличивают до 10–15 мм.

Закалку с индукционным нагревом (нагревом токами высокой частоты – ТВЧ) используют при массовой обработке стальных изделий. Она основана на выделении теплоты при прохождении переменного тока высокой частоты в поверхностном слое металлического изделия. Этот ток индуцируется окружающим изделие контуром, создающим переменное электромагнитное поле. Поверхностный нагрев обеспечивается действием *скин-эффекта*, который заключается в том, что индуцированный переменный ток протекает в более тонком слое с повышением частоты этого тока и магнитной проницаемости материала.

Глубина закалки обычно определяется условиями работы детали и составляет, как отмечалось, от 1,5–3,0 мм (усталостное изнашивание) до 10–15 мм (особо высокие контактные нагрузки). Источником ТВЧ служат специальные генераторы различной мощности. Поскольку закалка с индукционным нагревом экономически эффективна только при обработке больших партий изделий, обычно эту операцию выполняют на автоматизированных установках. В зависимости от размеров изделий применяют режимы обработки, основанные на различных сочетаниях нагрева и охлаждения. Закалку с индукционным нагревом используют в основном для сталей, содержащих 0,4–0,5 % углерода (стали 40, 45, 40X, 45X, 40XH и др.). Индукционному нагреву на большую глубину (объемно-поверхностная закалка) подвергают специальные стали пониженной прокаливаемости, содержащие 0,55–0,63 % углерода и менее 0,5 % примесей.

Закалка с индукционным нагревом позволяет получить мелкозернистую структуру стали с твердостью на 3–5 HRC выше, чем при обычной закалке. Возникающие в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия резко

повышают сопротивление усталостному разрушению, которое обычно инициируется образованием поверхностных трещин под действием растягивающих напряжений.

Таблица 5.5 – Скорость охлаждения стали в различных закалочных средах

Среда	Скорость охлаждения, град/с, в интервале температур, °С	
	650–550	300–200
Спокойный воздух	3	1
Сжатый воздух	30	10
Мыльная вода	30	200
Эмульсия масла в воде	70	200
Масло промышленное	120	25
Вода, насыщенная углекислотой	150	200
Керосин	180	60
5%-ный раствор марганцовокислого калия	450	100
Вода при температуре, °С:		
18	600	270
25	500	270
50	100	270
75	30	200
10%-ный водный раствор (при 18 °С):		
сода	800	270
поваренной соли	1100	300
едкого натра	1200	300

В последние годы расширяется применение индукционного нагрева при обработке тяжело нагруженных деталей машин. Его используют:

- 1) для поверхностной закалки деталей;
- 2) нагрева под пластическое деформирование при упрочнении деталей;
- 3) интенсификации процессов химико-термической обработки (цементации и нитроцементации).

При закалке индукционным нагревом отсутствуют окисление и обезуглероживание поверхности стальных деталей (по сравнению с печной термической обработкой), снижаются термические деформации, что позволяет упрочнять ряд деталей без последующей шлифовки.

Закалка с индукционным нагревом дает наибольший эффект упрочнения для деталей простой формы, поскольку в этом случае закалочные деформации имеют минимальную величину.

Для устранения закалочных трещин и деформаций специально конструируют закалочные устройства для каждой группы деталей и жестко контролируют их нагрев и охлаждение.

Газопламенную поверхностную закалку применяют для крупных единичных изделий или их малых партий (коленчатые валы особо мощных двигателей, прокатные валки и т. д.). Ее осуществляют при нагреве поверхностного слоя пламенем сгорающего газа, имеющим температуру

2400–3000 °С. При этом виде закалки в крупном изделии создаются меньшие внутренние напряжения, чем при обычной объемной закалке.

Закалка в электролите основана на том, что при пропускании тока через электролит (5–10%-ный раствор кальцинированной соды) на катоде (детали) образуется газовая рубашка водорода. Ток при этом резко возрастает и деталь нагревается, после чего, отключив ток, можно сразу закалить ее в том же электролите. Способ применяется для закалки небольших деталей массового производства.

При *лазерной закалке* осуществляют высокоскоростной разогрев поверхностного слоя металла под действием лазерного луча. Этот вид поверхностного упрочнения имеет ряд достоинств по сравнению с традиционными методами, особенно в случаях, когда нужно повысить износостойкость поверхностного слоя детали.

Лазерной закалкой можно упрочнять в различных режимах и тонкие (до 0,2 мм), и сравнительно толстые (до 3 мм) слои как на небольших участках деталей, так и на поверхностях большой площади. При этом наряду с упрочнением можно изменять шероховатость деталей, обрабатывать лучом лазера труднодоступные полости, режущие кромки инструмента и т. д.

В процессе лазерной обработки не требуется применения закалочных сред, поскольку их роль выполняет сам металл, отводя тепло, что обеспечивает высокую скорость охлаждения (до 10^6 – 10^8 град/с) после кратковременного нагрева. Длительность нагрева у различных лазеров не превышает 10^{-9} – 10^{-6} с, что позволяет широко варьировать глубину прогрева и степень фазовых превращений в стали. В ряде случаев при лазерной обработке добиваются полного проплавления поверхностного слоя, а скоростная кристаллизация и фазовые превращения приводят к образованию мелкозернистой мартенситной структуры с микротвердостью, значительно превышающей достигаемую другими методами поверхностной закалки. В некоторых режимах проплавления возможно получение аморфной структуры.

В последние годы наряду с импульсными лазерами и лазерами непрерывного действия для упрочнения поверхности используются пучками электронов с различной энергией (*электронно-лучевая закалка*). Лазерное упрочнение успешно сочетают с ультразвуковой обработкой или с последующей обработкой холодом. Об эффективности лазерно-криогенного упрочнения свидетельствуют данные таблицы 5.6.

Таблица 5.6 – Микротвердость инструментальной стали после комплексного лазерно-криогенного упрочнения

Марка стали	Микротвердость HV ₁₀₀		
	исходная (закалка – отпуск)	после лазерной закалки	после лазерной закалки и криогенной обработки
У12	734	976	1070
ХВГ	734	976	1119
Р6М5	834	934	1070

При плазменной закалке упрочнение происходит также за счет быстрого (за несколько миллисекунд) нагрева поверхности стали или чугуна выше температуры аустенизации с последующей самозакалкой в результате быстрого охлаждения отводом тепла в объем обрабатываемой детали.

В таблице 5.7 представлены результаты плазменной закалки конструкционных материалов в сопоставлении с закалкой ТВЧ. Видно, что плазменная закалка является эффективным средством упрочнения деталей. Имеются сведения о повышении ресурса деталей трансмиссий транспортных средств (в частности коленчатых валов двигателей) более чем в 2 раза за счет плазменного упрочнения, при этом энергозатраты при плазменной закалке в 8–10 раз меньше, чем при закалке ТВЧ.

Таблица 5.7 – Микротвердость сталей и чугунов после обработки плазменной струей

Материал деталей	Микротвердость, кг/мм ²		
	исходная	после термообработки ТВЧ	после термоупрочнения плазменной струей
Сталь 35	45	127	85–180
Сталь 40Х	47	148	125–318
Сталь 42ХМФА	35	137	117–322
Сталь 45	52	137	92–402
Сталь 50Г	47	148	83–180
Сталь 18ХГТ	35	110	97–165
СЧ 19	28	35	41–110
СЧ 25	27	34	44–150

Химико-термическая обработка (ХТО) – это высокотемпературная обработка металлических деталей в химически активных средах для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев. ХТО является одним из наиболее эффективных и распространенных методов повышения работоспособности деталей машин. Она позволяет повысить твердость, износостойкость, усталостную и контактную выносливость, а также коррозионную стойкость поверхностных слоев, не меняя структуры и свойств сердцевины детали. Возможности ХТО выше, чем термической обработки, поскольку ХТО меняет не только структуру, но и химический и фазовый состав поверхностных слоев.

Главными факторами ХТО являются температура и время термообработки, а также концентрация активного химического компонента на поверхности стальной детали.

Образование модифицированного слоя на поверхности детали протекает в два этапа: на первом происходит адсорбция атомов модифицирующего компонента на обрабатываемой поверхности, на втором – их диффузия в поверхностные слои детали. Необходимым условием формирования диффузионного слоя является растворимость модифицирующего элемента в

насыщаемом металле или образование с ним химического соединения при температуре ХТО. Интенсивность диффузионного процесса зависит от температуры и продолжительности термообработки, а также от начальной концентрации диффундирующих атомов в поверхностном слое.

Если диффузия модифицирующего элемента в обрабатываемый сплав не ускоряется внешним воздействием, изменение фазового состояния и структуры поверхностного слоя стальной детали определяется диаграммой состояния «обрабатываемый сплав – модифицирующий элемент». Охлаждение диффузионной зоны может привести к фазовым превращениям, аналогичным тем, которые происходят согласно диаграмме состояния сплава при его охлаждении.

Процесс диффузионного насыщения может протекать под воздействием интенсифицирующих факторов (например, при обработке лазерным или электронным пучком поверхности с адсорбированной пленкой модифицирующего элемента или поверхностного слоя, в который внедрены ионы модифицирующего элемента из ионного пучка или плазменного разряда). В результате лазерный или электронно-лучевой нагрев интенсифицирует диффузию, обеспечивая недостижимые традиционными способами концентрации модифицирующих элементов и фазовый состав в поверхностном слое.

Самые распространенные методы ХТО: цементация, азотирование, нитроцементация, хромирование, алитирование и борирование.

Цементация – это насыщение углеродом поверхностных слоев стальных изделий для повышения их твердости. Обычно после цементации изделие подвергают закалке и низкому отпуску, а затем шлифуют для повышения качества поверхности. Цементируют обычно стали с содержанием углерода 0,08–0,23 %, поэтому сердцевина стального изделия сохраняет вязкость, а поверхностный слой (с содержанием около 1 % углерода) обладает высокими твердостью и износостойкостью.

Иногда цементируют только часть поверхности изделия, а остальную поверхность защищают электролитическим медным покрытием или специальными защитными обмазками.

Наиболее часто цементации подвергают детали подвижных сопряжений в машинах, работающих в условиях трения и высоких контактных нагрузок (шестерни, валы, пальцы, кулачки и т. д.).

Диффузионное насыщение поверхностного слоя стали углеродом при цементации происходит из среды, называемой *карбюризатором*. Для того чтобы создать поток диффузии с поверхности в глубь изделия, необходимо обеспечить адсорбцию на поверхности детали атомов углерода из диссоциирующих соединений (обычно оксидов или углеводородов).

Структура слоя сразу после цементации обычно получается крупнозернистой, что связано с выдержкой стали при высокой температуре. Термиче-

ская обработка изделий после цементации служит для исправления структуры, измельчения зерна и повышения комплекса механических свойств поверхностного слоя.

Газовую цементацию наиболее широко применяют для деталей массового производства. Для ее осуществления используют природный газ, контролируемые атмосферы, получаемые в специальных генераторах, а также пары жидких углеводородов. Основной реакцией, обеспечивающей выделение свободного углерода, является диссоциация метана и оксида углерода: $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$ или $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$. В зависимости от состава газовой смеси в печи она может иметь различную науглероживающую способность (способность обеспечивать заданное содержание углерода в поверхностном слое). Достоинством газовой цементации является возможность регулирования этого фактора в заданных пределах. Скорость газовой цементации при температуре 930–950 °С составляет 0,12–0,15 мм/ч при толщине цементированного слоя 0,5–2,0 мм. В зависимости от толщины слоя время обработки изменяется в интервале от 4 до 15 часов.

Установка для газовой цементации (без доступа воздуха) содержит следующие агрегаты: проходную высокотемпературную цементационную печь, закалочный бак, низкотемпературную печь для отпуска, транспортирующее устройство и моечные машины.

Цементация обеспечивает (по сравнению с закалкой ТВЧ) повышение предела выносливости в 3 раза, износостойкости – в 1,5–2,0 раза, $\text{HRC} \leq 65$ МПа.

Азотирование – это диффузионное насыщение азотом поверхностных слоев стальных деталей в целях повышения их износостойкости, предела выносливости и коррозионной стойкости. Преимуществом азотирования перед цементацией является более высокая твердость обработанного поверхностного слоя, которая сохраняется до значительно более высоких температур (до 600 °С), чем в случае цементации (до 230 °С).

Низкотемпературное азотирование (при температурах ниже 600 °С) применяют для упрочнения деталей машин из конструкционных (перлитного, ферритного, аустенитного и карбидного класса) сталей, а также чугунов.

Высокотемпературное азотирование (при температурах 600–1200 °С) используют для ферритных и аустенитных сталей, а также сплавов тугоплавких металлов.

Выбор сталей для азотирования определяется назначением деталей из них. Эффект повышения износостойкости и усталостной прочности стали зависит от содержания углерода и легирующих добавок. Повышение коррозионной стойкости при насыщении азотом имеет место для всех сталей, включая углеродистые, и чугунов. Перед азотированием назначают улучшение и чистовую обработку, после азотирования изделия шлифуют или полируют.

Азотирование проводят в основном газовым методом в электрических печах периодического (шахтных и камерных) и непрерывного (толкательных, карусельных и конвейерных) действия. Средой, из которой диффундирует азот в сталь, является, как правило, аммиак, который диссоциирует по схеме: $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$. Температура, при которой осуществляется азотирование, составляет 500–600 °С в зависимости от вида изделий и необходимой толщины азотированного слоя.

Износостойкость и коррозионная стойкость, твердость и стойкость к отпуску сталей при азотировании выше, чем при цементации. Так, износостойкость азотированных сталей в два – четыре раза превышает износостойкость цементированных сталей. Предел выносливости стали 40 после кратковременного азотирования увеличивается в 1,5–1,6 раза, что объясняется формированием в поверхностных слоях нитридных фаз, имеющих большой удельный объем, и, как следствие, возникновением на поверхности высоких остаточных напряжений сжатия. Азотирование стали 30 повышает предел коррозионной усталости в морской воде в два раза.

Между тем азотирование используют реже, чем цементацию. Это обусловлено малой толщиной упрочненного слоя (до 0,2–0,5 мм) и большой длительностью процесса (требуется ~10 час на формирование слоя толщиной 0,1 мм). Скорость азотирования на порядок меньше скорости цементации.

Простым и эффективным способом сократить в 1,5–2,0 раза время обработки является двухступенчатый режим: сначала азотирование ведут при 500–520 °С, а затем – при 540–560 °С. Помимо двухступенчатой выдержки деталей при различных температурах, используют обработку в газовых средах, содержащих аммиак и углеводороды, а также чередование азотирующей среды с инертной при различных температурах выдержки. Для этого используют насыщение азотом при нагреве ТВЧ и в плазме тлеющего разряда и ионную имплантацию азота.

Толщина и прочностные характеристики азотированного слоя зависят от состава и свойств насыщающей среды, температуры и времени насыщения, а также от химического состава стали.

Одновременное насыщение поверхности стальных деталей углеродом и азотом в зависимости от агрегатного состояния насыщающей среды называют нитроцементацией, цианированием и карбонитрацией.

Н и т р о ц е м е н т а ц и я – это процесс диффузионного насыщения стали углеродом и азотом из газовой фазы (обычно из газовой среды, применяемой при цементации, с добавлением аммиака). Температура нитроцементации примерно на 100 °С ниже, чем обычной цементации (840–860 °С), продолжительность процесса значительно меньше (4–10 ч), так как диффузия углерода существенно ускоряется в присутствии азота. Толщина диффузионного слоя, как правило, составляет 0,2–2,0 мм. После нитроцементации осуществляют закалку и низкий отпуск (160–180 °С). Конечная структура нитроцементированного слоя состоит из мелкокристаллического мартенсита, остаточного

аустенита и небольшого количества дисперсных включений карбонитридов. Твердость слоя достигает 58–64 HRC (570–690 HV) при содержании азота до 0,4 % и углерода до 1,65 %.

Нитроцементация также увеличивает износостойкость и усталостную прочность стальных деталей. Ее используют при обработке стальных деталей сложной конфигурации, которые при обычной цементации подвержены короблению (таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Режимы процессов химико-термической обработки

Вид обработки	Температура, °С	Время обработки, ч	Толщина слоя, мм	Скорость обработки, мм/ч
Цементация	930–950	4–15	0,5–2,0	0,12–0,15
Азотирование	500–600	20–60	0,2–0,5	0,01–0,04
Нитроцементация	840–860	4–10	0,2–2,0	–

Ци а н и р о в а н и е заключается в диффузионном насыщении стали азотом и углеродом из расплавов солей, содержащих цианаты. После такого насыщения диффузионный слой обладает повышенными показателями износостойкости, предела выносливости и коррозионной стойкости. Производительность цианирования и качество получаемых поверхностей выше, чем при цементации.

Низкотемпературное цианирование, которое проводят при 570 °С, называют *карбонитрацией* (или *твердым цианированием*). При карбонитрации происходит диффузионное насыщение стали азотом и углеродом из расплавов карбонатов и цианатов (например, смеси KCN, NaCN и Na₂CO₃). При карбонитрации усталостная прочность легированных сталей возрастает на 50–80 %, а по износостойкости они превосходят цементированные, нитроцементированные и азотированные стали. Твердость достигает 1000–1100 HV при толщине диффузионного слоя до 100 мкм.

Среднетемпературное цианирование проводят при температуре 820–860 °С в расплаве из смеси солей (NaCN, NaCl и Na₂CO₃) в течение 0,5–1,5 ч. Толщина диффузионного слоя достигает 0,15–0,35 мм, содержание азота и углерода составляет 1,2 и 0,8 %.

Высокотемпературное цианирование выполняют для получения диффузионных слоев толщиной до 2 мм. Температура процесса составляет 930–950 °С при выдержке до 6 ч. Расплав готовят из смеси солей (NaCN, BaCl₂ и NaCl).

Д и ф ф у з и о н н а я м е т а л л и з а ц и я – это диффузионное насыщение стали одним металлом или комплексом химических элементов, включая металлы. Такое насыщение проводят из расплава основного диффундирующего металла или его солей, из газовой фазы, а также путем металлизации в вакууме. Наибольшее распространение получили методы алитирования и хромирования, а также комплексные методы насыщения титаном, ванадием,

медью, вольфрамом, цирконием и другими металлами в сочетании с алюминием, хромом или неметаллами.

Диффузионное алитирование – процесс диффузионного насыщения алюминием – проводят с целью повышения жаро- и эрозионной стойкости, а также коррозионной стойкости деталей из углеродистых сталей. Процесс осуществляют в основном в порошковых смесях (металлического алюминия с его оксидом и хлористым аммонием), расплаве алюминия или при отжиге стальной детали с алюминиевым покрытием. Температура процесса составляет от 720 °С (в расплаве) до 1050 °С (в порошковой смеси) при длительности от 15 мин до 12 ч в зависимости от требуемой толщины алитированного слоя (до 1 мм при содержании алюминия в слое до 30 %). Структура диффузионного слоя представляет собой твердый раствор алюминия в α -железе.

Диффузионное хромирование – процесс диффузионного насыщения стали хромом – обеспечивает повышение коррозионной и эрозионной стойкости, окалинстойкости деталей, а при содержании углерода в стали 0,3–0,4 % – увеличение их твердости и износостойкости. Хромирование используют для деталей из сталей любых марок. Процесс осуществляют в основном из порошковой фазы (смесь феррохрома, оксида алюминия и хлористого алюминия) при температуре 950–1100 °С и продолжительности выдержки 6–12 ч. Структура диффузионного слоя – тонкий слой карбидов хрома (0,025–0,030 мм) и переходной слой, обогащенный углеродом. Твердость поверхностного слоя деталей достигает 1200–1300 HV при толщине до 0,3 мм. Высокая поверхностная твердость хромированной стали обуславливает ее высокую износостойкость при сухом трении, которая на порядок превышает эту характеристику цементированных и закаленных сталей. Кроме того, она обладает очень высокой эрозионной стойкостью и сопротивлением кавитационному износу. Хромирование углеродистых сталей позволяет в ряде случаев заменить дорогостоящие высоколегированные сплавы для ответственных деталей.

Некоторые металлы и неметаллы вводят в поверхностные слои стальных деталей комплексно. К таким методам их диффузионного насыщения относят *хромтитанирование*, *хромосилицирование*, *хромоалитирование*, *борохромирование* и *боросульфидирование*, *карбованадийтитанирование*, *цирконотитанирование* и *цирконосилицирование*. Указанные методы обработки обеспечивают более эффективное упрочнение поверхностного слоя деталей в сравнении с насыщением только одним элементом. Однако технология комплексного диффузионного насыщения вследствие сложности используется в машиностроении ограниченно.

Применение индукционного нагрева существенно интенсифицирует ХТО. При химико-термической обработке стальных деталей резко сокращается время их нагрева до температуры насыщения (при печном нагреве – часы, при индукционном нагреве – секунды), ускоряется процесс диффузии.

Это связано с активизацией поверхностных реакций, с созданием повышенного градиента концентрации диффундирующего элемента в поверхностных слоях деталей, а также с измельчением зерен и увеличением протяженности границ зерен аустенита. Например, толщина цементированного слоя при индукционном нагреве в 3–5 раз превышает толщину слоя при печном.

Высокоэнергетические методы химического модифицирования поверхностных слоев стальных деталей. Наиболее эффективными методами модифицирования поверхностных слоев деталей являются ионно-диффузионное модифицирование в тлеющем разряде, ионная имплантация (ионное легирование), а также сочетание ионно-плазменных методов с лазерной или электронно-лучевой обработкой.

Примером ионно-диффузионного модифицирования служит *ионное азотирование*. Его проводят в тлеющем разряде постоянного напряжения (400–1400 В) в разреженной среде азота или аммиака, при этом деталь является катодом, а корпус установки – анодом. Ионы газа бомбардируют поверхность детали и нагревают ее.

Процесс ионного азотирования протекает в две стадии. На первой происходит очистка поверхности катодным распылением (при давлении азотсодержащей среды до 15 Па) при нагреве поверхности детали до температуры 250 °С, на второй – азотирование (при давлении азотсодержащей среды до 1,5 кПа).

Ионы азота, ударяясь о поверхность обрабатываемой детали (катада), осаждаются на ней, а затем диффундируют вглубь, поскольку поверхность детали разогревается при бомбардировке ионами до 500–600 °С. Толщина диффузионного слоя составляет 0,10–0,25 мм. При соударении ионов (с энергией в несколько сот электрон-вольт) с поверхностью детали происходит ее очистка от адсорбированных и оксидных пленок, препятствующих проведению обычного азотирования ряда сталей, например коррозионнотойких.

По сравнению с традиционным азотированием длительность ионного модифицирования сокращается в 2–3 раза, а общее время технологического процесса – в 3–5 раз. Достоинством этого метода является возможность эффективного регулирования процесса диффузионного насыщения азотом поверхностных слоев стальных деталей с оптимизацией их структуры и свойств. механические свойства поверхностного слоя повышаются. Этот метод используют для упрочнения деталей и конструкций, эксплуатирующихся в условиях усталостного изнашивания при высоких контактных нагрузках, а также при коррозионном воздействии.

Кроме азотирования, ионно-диффузионными методами можно провести *цементацию, силицирование, борирование и комплексное насыщение* (карбонитрирование и др.) поверхностных слоев стальных деталей.

Ионная имплантация основана на том, что при повышении энергии бомбардирующих ионов последние проникают вглубь металла,

упрочняя поверхностный слой за счет искажения его кристаллической решетки. Энергия ионов при имплантации составляет 10–200 кэВ, а плотность ионных пучков – 10^{15} – 10^{18} частиц на 1 см^2 . С помощью ионной имплантации можно осуществить азотирование, борирование, оксидирование поверхностного слоя деталей и легирование его различными металлами. При ионной имплантации износо- и коррозионная стойкость поверхностных слоев стальных деталей существенно повышается без изменения размеров последних. Значительно (в 8–10 раз) растет усталостная долговечность углеродистых и легированных сталей. На рисунке 5.10 представлены результаты влияния азотной имплантации (энергия ионов 150 кэВ) на усталостную долговечность, которая показывает существенное увеличение предела выносливости углеродистой стали.

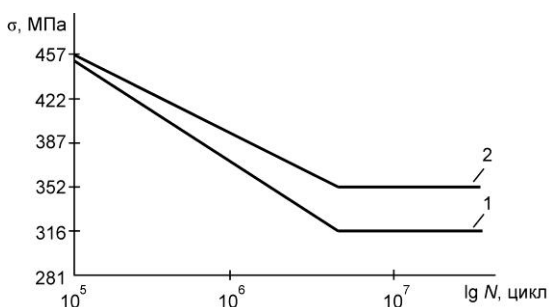


Рисунок 5.10 – Влияние имплантации азотом на усталостную долговечность стали:
1 – без имплантации; 2 – после имплантации

При реализации данного метода можно получить в поверхностном слое такие фазы, которые невозможны в равновесном состоянии, например из-за ограниченной взаимной растворимости компонентов. Основными недостатками метода являются относительно высокая стоимость оборудования, невозможность обработки изделий сложной формы, а также

малая толщина имплантированного слоя.

К перспективным методам поверхностного модифицирования конструкционных материалов относятся лазерное поверхностное и электронно-лучевое легирование.

Лазерное поверхностное легирование характеризуется, как и лазерная закалка, интенсивным кратковременным тепловым воздействием на поверхностный слой детали. Главными параметрами являются *плотность энергии* лазерного излучения, подводимой к поверхности, и *длительность облучения*. При лазерном легировании тепловое воздействие сочетается с подведением к поверхности детали легирующих элементов. Для этого на обрабатываемую лазером поверхность предварительно наносят тонкое покрытие из легирующего элемента (например, методом плазменного напыления или электролитическим) или осуществляют ионную имплантацию легирующего элемента в поверхностный слой перед лазерной обработкой.

Возможна и одновременная подача легирующего элемента в зону обработки в момент лазерного облучения. Лазерная обработка вызывает проплавление поверхностного слоя и смешение легирующего элемента с материалом основы. Последующая скоростная кристаллизация в металле завершается образованием метастабильных фаз, состав которых может резко отличаться от равновесного. В частности, лазерная обработка углеродистых и легированных сталей значительно повышает предел выносливости (с 200–300 до 520 МПа). Сравнительные испытания образцов из стали 45 показывают преимущества лазерной обработки (рисунок 5.11).

Лазерное легирование углеродистых сталей позволяет получать поверхностные слои деталей с требуемыми структурой и комплексом свойств. Хорошие результаты достигнуты при обработке сканирующим лазерным лучом стальных изделий, покрытых порошками хрома и никеля; при этом существенно повышаются износостойкость и коррозионная стойкость изделий.

Электронно-лучевое поверхностное легирование сталей осуществляют в вакууме при облучении детали потоком электронов. Оно дает результаты, аналогичные результатам лазерного легирования. Возможно как предварительное, так и одновременное подведение легирующих элементов в зону обработки.

Применение электронно-лучевого и лазерного легирования, а также ионно-плазменных методов упрочнения сталей ограничено из-за высокой стоимости и сложности технологического оборудования. Однако потенциальные возможности высокоэнергетических методов модифицирования поверхностных слоев металлических деталей очень высоки, что обуславливает перспективы их широкого внедрения в машиностроение.

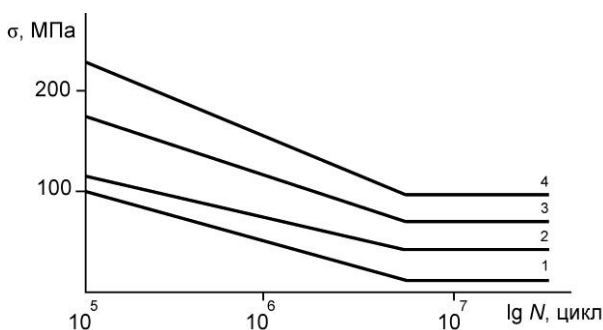


Рисунок 5.11 – Влияние вида упрочняющей обработки на кривые усталости образцов из стали 45:

1 – без обработки; 2 – упрочнение роликом; 3 – электромеханическая обработка; 4 – лазерное упрочнение

Механическая обработка пластическим деформированием деталей является эффективным средством повышения их работоспособности. Поверхностным пластическим деформированием (ППД) называют обработку заготовки давлением при помощи специального инструмента, при которой деформируется материал заготовки без образования стружки.

Физико-механические свойства деталей, в частности, свойства поверхностных слоев, влияющие на их износостойкость и другие триботехнические характеристики, определяются природой металла, а также его термической или другой обработкой.

Главными факторами механической обработки являются *время и величина силового воздействия* инструмента (материала) на структуру и свойства поверхностных слоев металлических деталей.

Как уже отмечалось, силовое воздействие на поверхностные слои материала обрабатываемой детали вызывает наклеп, т. е. упрочнение металла при его пластическом деформировании. Пластическая деформация приводит к измельчению зерен, уменьшению размеров блоков, вызывает сдвигообразование в зернах металла, упругое искажение кристаллической решетки. В результате наклепа повышаются характеристики сопротивления деформации, понижается пластичность и увеличивается твердость металла, что объясняется массовым развитием дислокаций и их концентрацией вдоль линий сдвигов. Наклеп приводит к равномерному распределению множества дислокаций в деформированном объеме металла, выпадению из твердого раствора карбидных частиц, препятствующих сдвигам по плоскостям скольжения, поэтому для последующих пластических деформаций необходимо значительно большее напряжение, чем в неупрочненном металле.

В закаленных, а также в цементированных сталях пластическая деформация ведет к распаду остаточного аустенита и повышению за счет этого их твердости.

Повышение сопротивления усталости деталей, подвергнутых наклепу, сопровождается также изменением микрорельефа их поверхности: уменьшением высоты микронеровностей, увеличением радиусов впадин этих неровностей, уплотнением поверхностного слоя и закрытием микропор. Последнее способствует увеличению коррозионной стойкости металла.

Упрочнение поверхностного слоя деталей пластическим деформированием приводит к повышению износостойкости. Повышение твердости в результате наклепа способствует уменьшению взаимного внедрения и контактного схватывания, что увеличивает износостойкость трущихся поверхностей.

С помощью ППД решаются две основные задачи: упрочнение поверхностного слоя материала детали и снижение шероховатости (до $R_a = 0,04 \dots 0,16$ мкм). В машиностроении используют различные методы обработки ППД и устройства для их осуществления. Обработку производят с использованием универсальных и специальных станков, станков с ЧПУ, полуавтоматов и автоматов.

Методы обработки ППД можно разделить на две основные группы:

а) *динамическое упрочнение*;

б) *обработка с использованием сил трения между инструментом и деталью*:

– *трения качения* (с проскальзыванием) за счет накатывания или раскатывания поверхности заготовки;

– *трения скольжения* за счет выглаживания обрабатываемой поверхности.

Дробеструйная обработка представляет собой динамическое упрочнение пластическим деформированием наружной поверхности детали под действием дробы, соударяющейся с ней с большой скоростью. Ее реализуют с помощью пневматических (под действием сжатого воздуха, гидравлических (под действием напора воды) и механических (под действием центробежных сил, развивающихся во вращающемся роторе) дробеметов. Она увеличивает на 20–40 % твердость деталей. Ее используют для упрочнения деталей сложной формы. При этом повышается циклическая долговечность: рессор – в 2–7; пружин – в 3–10; зубчатых колес (после закалки ТВЧ) – в 8–12; осей – в 3–5 раз.

Для обработки используют чугунную и стальную дробь. Толщина упрочненного слоя составляет 0,3–1,5 мм.

Чеканка также является ударной обработкой поверхности с помощью специальных приспособлений (механических, пневматических, электромеханических) и инструмента (например, ударника с бойком). Этим способом удобно упрочнять детали крупногабаритные и сложной формы, а также сварные швы металлоконструкций с помощью торцов проволок стальных канатов. При этом повышается на 20–50 % твердость, а также существенно растет долговечность (циклическая) крупных валов (в районе галтель), крупномодульных зубчатых колес (в районе впадин) и сварных металлоконструкций (в районе швов и близких к ним зон). Толщина упрочненного слоя составляет 0,5–3,5 мм.

Ко второй группе методов относятся *накатывание* (упрочняющее, сглаживающее, формообразующее, калибрующее), *виброобкатывание*, *поверхностное выглаживание*, *дорнование* и др.

Обкатка шариками или *роликами* относится к числу наиболее распространенных технологических способов упрочнения. Применяют два режима обкатки: *упрочняющий* и *упрочняюще-сглаживающий*.

При *упрочняющей обкатке* (и больших давлениях) достигаются высокая интенсивность и необходимая глубина наклепа (шероховатость поверхности при этом возрастает), повышение твердости поверхностного слоя на 24–40 %, а глубина наклепа составляет 0,02–0,04 диаметра детали (при сглаживающих режимах она не превышает 0,01 диаметра детали). *Упрочняюще-сглаживающая обкатка* наряду с повышением сопротивления усталости материала обеспечивает снижение параметров исходной шероховатости поверхности на 15–20 %.

Обкатку используют для упрочнения валов, осей, пальцев, шпилек, зубчатых колес и других деталей. Накатывают цилиндрические поверхности,

галтели, канавки, впадины зубьев и шлицев, торцевые поверхности и резьбы. Она позволяет получить глубину наклепа 3 мм и более, т. е. значительно большую, чем, например, при дробеструйной обработке. Это особенно важно для деталей больших размеров (глубина наклепа при обкатке подступичной части вагонных осей достигает 19 мм). Предел выносливости гладких образцов после обкатки повышается на 20–30 %, а при работе в коррозионно-активной среде – в 4 раза. Срок службы валов в результате накатки увеличивается в 1,5–2 раза, осей вагонов – в 25 раз.

При *центробежно-шариковом наклепе* (рисунок 5.12, *а*) обрабатывают как внутренние, так и внешние поверхности. Его эффективность снижается с ростом твердости детали. Обработка обеспечивает рост твердости на 15–60 % (он особенно эффективен с предварительной термической обработкой и химико-термической обработкой – закалкой, цементацией и др.).

Обрабатывают цилиндрические детали (коленчатые валы, тормозные шкивы, гильзы цилиндров, поршневые кольца, вкладыши подшипников).

Обкатывание (накатывание) роликами (рисунок 5.12, *б*) проводят с помощью специальных приспособлений, которые оснащают одним или несколькими накаточными роликами. Эффективность обкатки также растет с уменьшением исходной твердости детали. Размер детали меняется незначительно, поскольку в основном сминаются выступы рельефа поверхности, оставшиеся от механической обработки. Обкатка увеличивает твердость на 20–50 %. Этим методом формируют зубья (модулем до 2 мм) зубчатых колес с помощью одного или нескольких зубчатых роликов, накатывают шлицы, накатывают и раскатывают наружные резьбы. Как правило, упрочняют цилиндрические и винтовые поверхности.

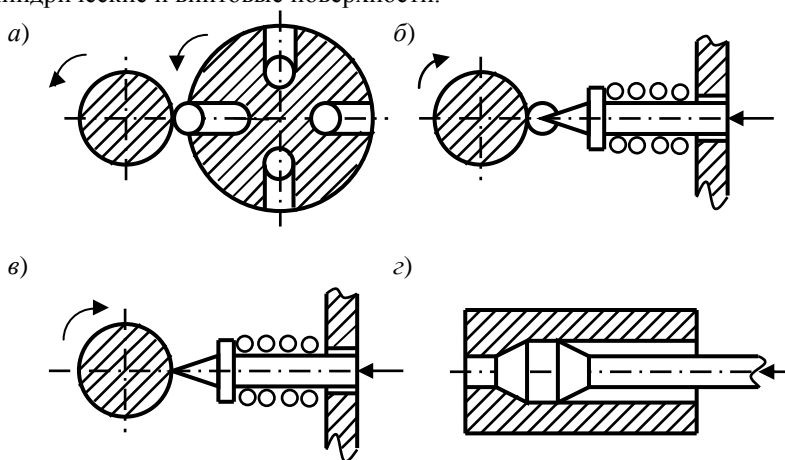


Рисунок 5.12 – Принципиальные схемы механического упрочнения деталей:
а – центробежно-шариковый наклеп; *б* – обкатывание роликами;
в – алмазное выглаживание; *г* – раскатывание

При этом значительно возрастает циклическая долговечность: штоков – в 3–4; болтов и шпилек (обкатка резьбы) – в 2 раза.

На рисунке 5.13 показана схема формирования резьбы на накатном станке. Заготовка 2 свободно обкатывается между двумя роликами 1 и 3, которые получают принудительное вращение с заданной скоростью. Ролику 3 придается также радиальное движение для вдавливания на заданную глубину и отвода после накатывания резьбы.

Накатывание зубьев роликми осуществляют на универсальных токарных, горизонтально-фрезерных, резьбонакатных, зубонакатных и других станках с использованием специальной оснастки. Для этого используют один или несколько зубчатых роликов (при радиальной или осевой подачах) или зубчатых реек. На рисунке 5.14 приведена схема накатывания зубьев заготовки 1 двумя роликми 2 с радиальной подачей с одновременным калиброванием роликми 3. Накатные роликми 2 получают вращение от ведущей шестерни 5 через ведомые шестерни 4. Заготовка фиксируется на валу ведущей шестерни прижимным устройством.

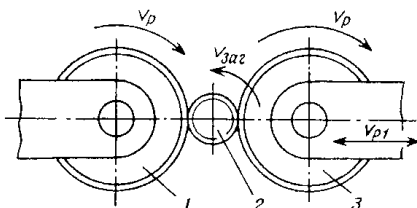


Рисунок 5.13 – Схема накатывания резьбы роликми:
1, 3 – роликми; 2 – заготовка

Такого же эффекта можно добиться с помощью алмазного выглаживания (см. рисунок 5.12, в). Оно является эффективным способом отделки и поверхностного упрочнения деталей. Параметр R_a шероховатости поверхностей при выглаживании доводится до 0,32–0,04 мкм при изменении характера шероховатости. Вместо микронеровностей с острыми вершинами и впадинами, которые характерны для поверхностей после точения и шлифования, создаются микронеровности с округлыми вершинами и впадинами. При этом значительно увеличивается площадь опорной поверхности деталей и ускоряется их приработка при трении. По сравнению со шлифованными деталями интенсивность изнашивания деталей после алмазного выглаживания уменьшается на 20–40 %, а коррозионная стойкость возрастает.

При алмазном выглаживании глубина наклепанного слоя редко превышает 0,2–0,3 мм, однако степень наклепа существенно увеличивается. В сочетании с оптимальной шероховатостью поверхности это позволяет значительно (на 20–40 %) повысить сопротивление усталости деталей.

Предварительную обработку поверхности под выглаживание выполняют тонким точением или шлифованием. Как правило, выглаживание не используют для обработки прерывистых поверхностей, а также поверхностей с большими отклонениями формы в поперечном сечении.

Выглаживание поверхностей деталей (как наружных, так и внутренних) осуществляют алмазными наконечниками, которые крепят в корпусах, оснащенных пружинными держателями. Пружины обеспечивают постоянный силовой контакт алмазной сферы с поверхностью. Ее радиус зависит от твердости материала детали: с увеличением твердости радиус уменьшают с 3,0 до 1,0 мм. Этим методом можно обрабатывать материалы любой твердости, поддающиеся пластическому деформированию (цветные металлы, а также стали, закаленные до твердости 60 HRC и выше, цементированные и азотированные, покрытые электролитическим хромом или другими твердыми покрытиями).

Усилия, прикладываемые к детали, находятся в пределах 50–300 Н, что позволяет применять данный метод для тонкостенных и нежестких деталей.

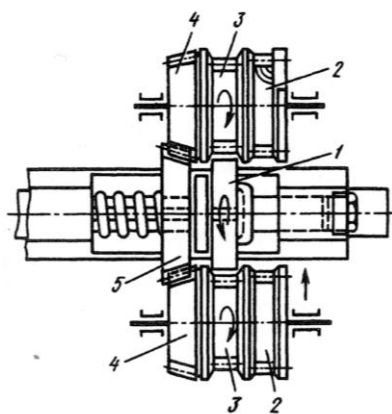


Рисунок 5.14 – Схема накатывания зубьев роликами:

1 – заготовка; 2 – накатные ролики;
3 – калибрующие ролики; 4 – ведомые шестерни; 5 – ведущая шестерня

ностных слоев возрастает в два раза.

Для снижения усилий дорнования и повышения качества обработанных поверхностей используют различные смазочные материалы, которые должны обеспечить жидкостное трение между заготовкой и дорном.

С увеличением силы, с которой рабочее тело (шарик, ролик, алмазный наконечник) прижимают к обрабатываемой поверхности, твердость упроченного слоя возрастает до определенного предела. Для каждого способа обкатки существует предельная величина силы, выше которой происходит снижение твердости обработанного материала. Как видно из рисунка 5.15, при алмазном выглаживании максимальный рост твердости достигается при

Выглаживание обычно осуществляют за один проход, при этом уменьшение подачи повышает эффективность обработки. Эффективность второго прохода значительно ниже: она не превышает 10–20 % первого.

Обработку внутренних поверхностей отверстий (например, отверстий пластин цепей) осуществляют раскатыванием (см. рисунок 5.12, 2) (развальцовыванием), калиброванием шариком и дорнованием (иногда называют дорнированием).

Раскатывание производят роликовыми и шариковыми раскатками, дорнование – шариками и дорнами (одно- и многозубыми). При этом растет твердость, уменьшается шероховатость, предел выносливости поверх-

значительно меньших значениях нормальной силы, чем при обкатывании шарами.

Экстремальный характер зависимости твердости от силы связан с тем, что при дальнейшем упрочнении из-за концентрации вакансий происходит субмикроскопическое нарушение сплошности металла, развитие микротрещин, охрупчивание переупрочненных слоев и отслаивание их от основной массы металла, что вызывает снижение твердости и увеличенное изнашивание трущихся деталей. Таким образом, перенаклеп поверхностного слоя вызывает снижение износостойкости деталей и сопротивления усталости материала.

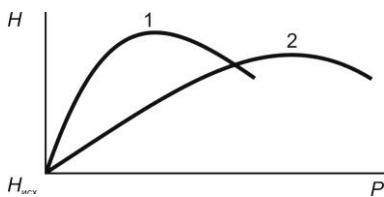


Рисунок 5.15 – Зависимость твердости упрочненного слоя от силы давления инструмента:
1 – при алмазном выглаживании;
2 – при обкатке шариками

5.6 Обеспечение требуемого качества сборки узлов и агрегатов

Сборка является заключительным этапом изготовления машины. От качества сборки зависят надежность и долговечность машины, ее эксплуатационные и технические характеристики. Отметим весьма значительную трудоемкость сборки, которая составляет от общей трудоемкости изготовления машины: 40–50 % – в единичном производстве; 15–20 % – в массовом производстве.

К основным видам сборочных работ относятся различные способы соединения деталей. Сборку двух или нескольких деталей выполняют в виде их *подвижного* или *неподвижного* соединения (рисунок 5.16).

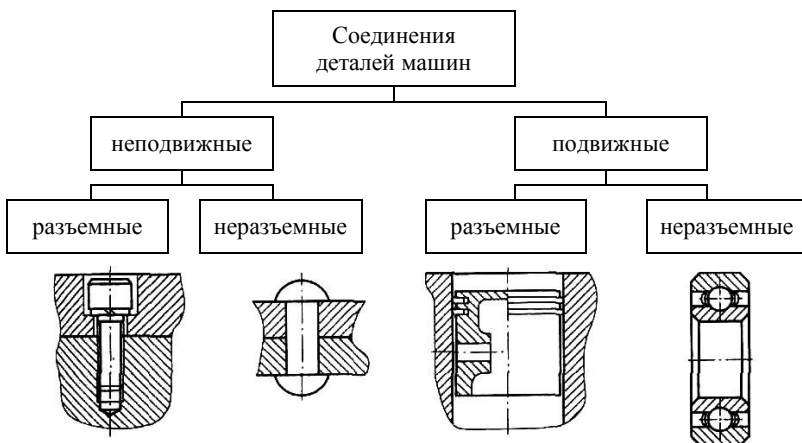


Рисунок 5.16 – Основные виды соединений деталей машин

При *неподвижном соединении* детали сохраняют неизменное относительное положение, при *подвижном* имеют возможность заданного перемещения. В свою очередь неподвижные и подвижные соединения могут быть *неразъемными* или *разъемными*.

В неподвижных разъемных соединениях детали соединяют путем посадки с натягом, посадки на конус, а также с использованием резьбовых крепежных деталей.

Неподвижные неразъемные соединения выполняют сваркой, пайкой, склеиванием, клепкой, посадкой под прессом с большими натягами и с температурным воздействием. Такие соединения применяют в тех случаях, когда в процессе эксплуатации разборка изделия не предусматривается (комплектные подшипники качения, масленки и т. п.).

В подвижном разъемном соединении детали соединяют путем посадок с гарантированным зазором, а также с использованием шаровых, винтовых и других поверхностей.

Необходимость качественного проведения сборочных работ определяет ряд требований к конструкции машин. Конструкция должна иметь простую компоновку и состоять из минимально возможного числа деталей и сборочных единиц. Следует максимально использовать стандартные, нормализованные и унифицированные детали и сборочные единицы, что способствует сокращению их общей номенклатуры и типоразмеров, повышению серийности изготовления и снижению себестоимости.

Для повышения точности сборки желательно ограничивать число кинематических и сборочных размерных цепей, что повышает уровень взаимозаменяемости и сокращает объем ручных пригоночных работ.

Конструкция машины должна обеспечивать возможность выполнения общей сборки из предварительно собранных узлов. Кроме того, следует предусматривать возможность параллельной сборки сборочных единиц, в результате чего значительно сокращается цикл сборки, а также появляется возможность контроля качества каждой сборочной единицы.

Сборочные единицы должны быть рассчитаны на минимальное количество различных видов технологических процессов сборки (соединение болтами, клепкой, сваркой, пайкой, склеиванием). Они должны представлять собой законченные изделия для конкретного производства и иметь минимально возможное число сочленений.

Расчленение сложной сборочной единицы должно предусматривать соединение простых сборочных единиц в определенной последовательности так, чтобы сборочные операции не мешали выполнению других. При этом следует учитывать возможность замены любой простой сборочной единицы без нарушения других соединений простых сборочных единиц. Кроме того, ее конструкция должна обеспечивать возможность проведения регулировочных и контрольных операций.

При соединении деталей необходимо обеспечить точность их взаимного положения, т.е. сборки.

Под точностью сборки понимают обеспечение соответствия значений параметров сборочной единицы их значениям, заданным в конструкторской документации.

При сборке необходимо обеспечить такое положение деталей и сборочных единиц, чтобы их рабочие поверхности в своем относительном движении и в статическом положении не выходили за пределы установленных допусков при сборке и эксплуатации.

Сборка бывает предварительная и окончательная. Предварительная сборка состоит в том, что машины после сборки, наладки и испытаний разбирают на сборочные блоки и в разобранном виде доставляют потребителю, где и производится окончательная сборка. По этому принципу собирают крупногабаритные машины (одноковшовые экскаваторы большой мощности, козловые и кабельные краны, путеукладчики и др.). При окончательной сборке изготовленные машины после сборки, наладки и испытаний в собранном виде отправляют потребителю (возможен только частичный демонтаж для перевозки по железной дороге).

Последовательность сборки и состав отдельных операций зависят от конструкции машины и соответствующего разделения сборочных работ. В общем случае машину подразделяют на сборочные элементы, связанные различным образом: детали, узлы, агрегаты (т.е. сборочные единицы различного уровня). Технологический процесс сборки каждой сборочной единицы изображают в виде развернутых схем. На них размещают детали и сборочные единицы более низкого уровня в той последовательности, в которой их устанавливают при сборке.

Сборка узлов может сопровождаться очисткой, обдувкой, промывкой и смазкой деталей, а также балансировкой, обкаткой и другими испытаниями. Важным показателем технологичности машины является ее сборка из предварительно собранных узлов. Такую сборку можно вести параллельно на нескольких специальных постах с применением средств механизации.

При выборе метода достижения требуемой точности сборки часто используют *теорию размерных цепей*.

Взаимосвязь размеров элементов детали или отдельных деталей, входящих в конструкцию соединения, сопряжения или узла, составляет размерную цепь. *Размерной цепью* называют совокупность взаимосвязанных размеров, образующих замкнутый контур и определяющих взаимное расположение поверхностей деталей, например в составе соединения или сопряжения. Размеры деталей, включаемые в размерную цепь, называют звеньями, а звено (т. е. размер), которое является последним при обработке или сборке, – *замыкающим звеном*, т.е. замыкающее звено является факти-

чески результатом изготовления остальных звеньев размерной цепи. Например, при решении задачи обеспечения натяга заданной величины в соединении величина этого натяга является замыкающим звеном и определяется точностью размеров деталей, входящих в размерную цепь. В свою очередь, величина натяга влияет на выбор метода сборки соединения. Любая конструкция, любое соединение представляют собой замкнутую размерную цепь.

Имеется несколько методов сборки, которые по-разному обеспечивают заданную точность замыкающего звена сборочной единицы:

- сборка с применением полной, неполной или групповой взаимозаменяемости;
- сборка с регулированием;
- сборка с пригонкой.

По методу полной взаимозаменяемости требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается за счет включения в нее составляющих звеньев без выбора или изменения их значений, т. е. требуемая точность достигается автоматически. Использование этого метода наиболее эффективно при малом числе звеньев размерной цепи, подлежащих сборке. К достоинствам можно отнести минимальную трудоемкость сборочных работ и возможность использования малоквалифицированной рабочей силы, поскольку процесс сборки сводится к соединению деталей без дополнительных мероприятий (сортировки или обработки). При эксплуатации обеспечивается быстрая замена изношенных деталей и сборочных единиц при необходимости ремонта.

Недостатками метода являются очень жесткие допуски размеров деталей, которые требуют совершенного оборудования, точных приспособлений, весьма квалифицированного персонала и т. п. Этот метод экономически оправдан в массовом или крупносерийном производстве.

По методу неполной взаимозаменяемости сборку проводят из деталей, изготовленных по более широким допускам. Как показывает практика, в условиях большой серии вероятность того, что детали будут иметь предельные отклонения размеров, при которых нарушаются требования к сборке, бывает весьма малой (0,01–0,02). Поэтому объем пригоночных и дополнительных разборочно-сборочных работ по этому методу невелик.

По методу групповой взаимозаменяемости сборку производят так, что требуемая точность замыкающего звена (например, посадки) достигается только в пределах специально подобранных групп деталей. Детали могут изготавливать по увеличенным допускам, а необходимые зазоры или натяги в сопряжениях достигаются подбором охватывающей и охватываемой деталей (отверстия и вала). В результате посадки с малыми допусками получают из сопрягаемых деталей, выполненных по большим допускам. Для этого изготовленные детали (условно – валы и

отверстия) разделяют на размерные группы с более узкими допусками, чем допуски на изготовление общих групп. При сборке подбирают пары деталей из этих размерных групп валов и отверстий так, чтобы обеспечить заданную точность посадки в каждой паре.

Таким образом, к достоинствам относится возможность использования широких допусков на изготовление и получение сопряжений высокой точности. Дополнительные затраты на предварительную сортировку окупаются экономией при изготовлении деталей по широким допускам.

К недостаткам групповой взаимозаменяемости следует отнести: во-первых, необходимость тотального измерения размеров деталей, усложняющего технологический процесс изготовления сборочных единиц; во-вторых, необходимость идентичности кривых распределения размеров валов и отверстий по форме и расположению центра группировки.

Для иллюстрации особенностей различных методов сборки на рисунке 5.17 представлены кривые нормального распределения размеров деталей сопряжения (вала и отверстия), характерные для методов полной и групповой взаимозаменяемости.

По методу полной взаимозаменяемости (рисунок 5.17, а) любая деталь (и в системе вала, и в системе отверстия) изготавливается в пределах допуска и удовлетворяет требованиям соединения деталей, если будет обеспечена необходимая посадка, т.е. будет выполнено условие

$$\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}, \quad (5.3)$$

где Δ_{\min} , Δ_{\max} – минимальный и максимальный допуски.

По методу групповой взаимозаменяемости (рисунок 5.17, б) детали изготавливают по увеличенным допускам, что требует необходимости их сортировки по группам после замеров. Те детали, которые соответствуют выполнению условия (5.3), удовлетворяют заданным требованиям точности. Остальные детали необходимо отсортировать по размерам так, чтобы они также обеспечивали необходимую посадку, но без выполнения условия (5.3). Например, если деталь в системе вала имеет уменьшенный диаметр, выходящий за рамки допускаемого, то деталь в системе отверстия также следует подбирать уменьшенного диаметра.

На рисунке 5.17 кривые имеют одинаковую форму и расположение центров группирования, поэтому на сборку сопряжений будет поступать равное количество деталей с одинаковыми допусками. Если же центры группирования валов и отверстий не будут совпадать, станет невозможным использовать все изготовленные детали без дополнительной механической обработки, т.е. без пригонки по месту.

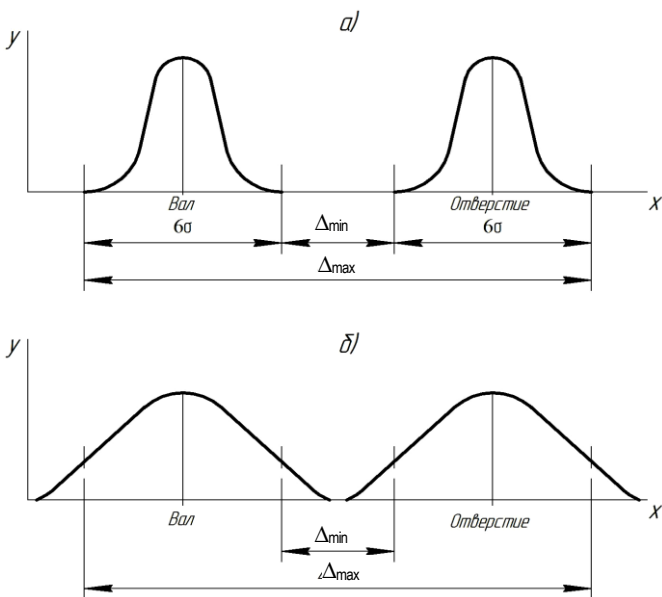


Рисунок 5.17 – Кривые нормального распределения размеров деталей в сопряжении:

a – для метода полной взаимозаменяемости; *б* – для метода групповой взаимозаменяемости

Групповую взаимозаменяемость широко используют в условиях крупносерийного и массового производства, в частности, при производстве подшипников, плунжерных пар двигателей внутреннего сгорания и др.

По методу сборки с регулированием необходимые посадки в сопряжении достигаются за счет введения в него специальной регулировочной детали – компенсатора.

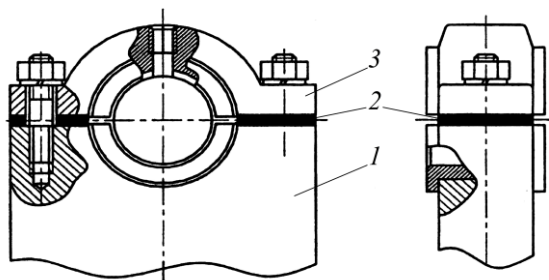
Компенсаторы могут быть *неподвижными*, *подвижными* и *упругими*. Чаще всего применяют неподвижные компенсаторы в виде прокладок, шайб, втулок, плит и др. Их положение в собранном узле фиксируют гайками, стопорными винтами, клиньями и др. В этих случаях точность сборки обеспечивается перемещением компенсатора. Роль компенсатора могут также выполнять муфты, регулировочные винты и т.п. При этом остальные детали сборочной единицы обрабатывают со сравнительно большими допусками. Этот метод эффективен в условиях серийного и крупносерийного производства. Он универсален, поскольку не зависит от объема выпуска деталей, числа звеньев в размерной цепи и допуска на замыкающее звено.

Кроме того, он имеет достаточно широкое применение, поскольку позволяет получать высокую точность сборки деталей, имеющих широкие допуски.

Регулировочные детали (чаще всего прокладки) заранее изготавливают требуемых размеров и легко подбирают после сборки других деталей для получения заданных параметров соединения. Использование метода также целесообразно при соединении деталей с базированием по плоскостям (привалочным плоскостям корпусных деталей, рамных конструкций и др.), а также при ремонте для восстановления работоспособности узлов.

На рисунках 5.18–5.21 приведены примеры использования неподвижных, подвижных и упругих компенсаторов. Так, радиальный зазор (см. рисунок 5.18) между валом и вкладышами подшипника скольжения регулируют прокладками 2 между корпусом 1 и крышкой 3.

Рисунок 5.18 – Схема обеспечения радиального зазора в подшипнике скольжения:
1 – корпус; 2 – набор прокладок; 3 – крышка



Подвижные компенсаторы (рисунки 5.19 и 5.20) в виде регулировочного винта 1 и регулировочной гайки 3 обеспечивают регулировку зазоров в различных механизмах. Наличие подвижных компенсаторов позволяет восстанавливать точность соединений при эксплуатации машины за счет периодического регулирования соединений.

При помощи упругих компенсаторов 3 и 6 (рисунок 5.21) устраняют несовпадения и перекося осей соединяемых валов 1 и 5 в муфте.

Компенсатором может служить как одна из деталей соединения, так и специально подобранная деталь (прокладка, шайба, кольцо и т.п.).

Для реализации этого метода сборки для большинства соединений необходимо проведение следующих дополнительных операций:

- предварительная сборка соединения;
- оценка правильности расположения сопрягаемых деталей;
- определение состава механических работ по пригонке компенсатора;
- разборка соединения;
- пригонка компенсатора;
- окончательная сборка соединения.

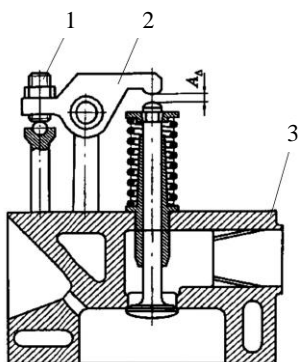


Рисунок 5.19 – Схема регулировки зазора в клапанном механизме:
1 – регулировочный винт; 2 – коромысло;
3 – головка блока цилиндров

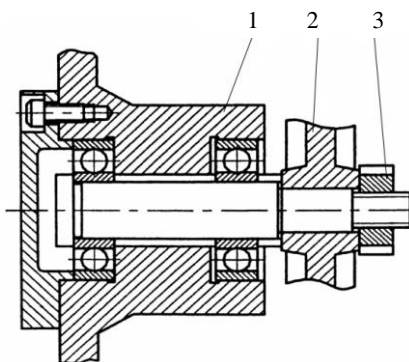


Рисунок 5.20 – Схема устранения осевого зазора в подшипниковом узле:
1 – подшипниковый узел; 2 – зубчатое колесо;
3 – регулировочная гайка

К недостаткам метода относится необходимость дополнительных работ по установке, подбору или регулировке с использованием компенсаторных деталей, в частности, работ по регулировке малонадежных резьбовых пар и клиньев, которые могут изменить свой размер в процессе эксплуатации.

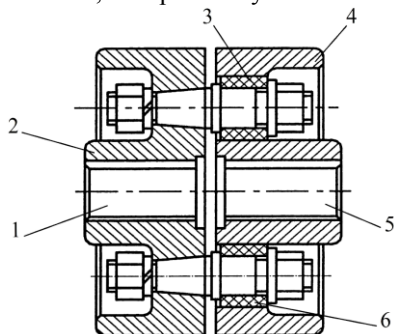


Рисунок 5.21 – Схема компенсации перекоса осей валов:
1, 5 – валы; 2, 4 – полумуфты;
3, 6 – компенсаторы

По методу сборки с пригонкой детали по месту заданная точность сборки достигается изменением размера одной из деталей соединения (как правило, компенсаторной детали) путем ее ручной пригонки за счет дополнительной механической обработки. Пригонку выполняют удалением слоя материала детали по месту точением, шлифованием, шабрением, притиркой или другими способами. При этом все остальные детали соединения обрабатывают по допускам, которые не вызывают технико-экономических затруднений на предприятии.

Таким образом, пригонка обеспечивает заданную точность посадки, но только для данного сопряжения конкретной сборочной единицы без возможности перестановки в другой узел. При этом необходимо проведение комплекса достаточно трудоемких дополнительных работ с привлечением специалистов высокой квалификации. Кроме того, введение компенсаторов

усложняет конструкцию сборочной единицы, повышает стоимость сборочных работ и их трудоемкость. Соответственно, метод используют в единичном и мелкосерийном производстве машин и механизмов, а также при их ремонте.

Контрольные вопросы к разделу 5

1 Дайте определение технологичности конструкции машины и ее основных видов, перечислите количественные показатели производственной технологичности.

2 Что такое конструкторская, технологическая и измерительная базы?

3 Назовите основные этапы разработки единичного технологического процесса изготовления деталей.

4 Что такое погрешность базирования и как ее избежать?

5 Назовите особенности и различия группового и типового методов механической обработки деталей.

6 Что такое деталь-представитель?

7 Назовите наиболее информативные и распространенные суммарные отклонения формы и расположения поверхностей деталей при механической обработке.

8 Назовите главные факторы воздействия на прочностные свойства деталей термической, химико-термической и термомеханической обработки.

9 Когда применяют закалку, отжиг, нормализацию и отпуск при обработке деталей?

10 Сопоставьте и сравните эффективность упрочнения цементации, азотирования и нитроцементации.

11 Чем отличаются высокоэнергетические методы химического модифицирования от химико-термической обработки стальных деталей?

12 Как обеспечить точность размеров деталей при механической обработке?

13 Как выглядит кривая нормального распределения фактических размеров деталей?

14 Дайте определения параметров шероховатости R_a и R_z .

15 Что такое наклеп?

16 Нарисуйте и объясните графическую зависимость параметра шероховатости поверхности детали от скорости резания при механической обработке.

17 В чем различия обработки поверхности деталей динамическими методами и методами с применением трения?

18 Назовите режимы обкатки шариками и роликами деталей и их влияние на свойства поверхности деталей.

19 Начертите схемы упрочнения деталей алмазным выглаживанием, обкаткой роликами и раскатыванием.

20 Что такое размерная цепь?

21 Назовите достоинства основных методов сборки: с применением полной, неполной или групповой взаимозаменяемости, с регулированием и с пригонкой.

22 Как при сборке по методу групповой взаимозаменяемости обеспечить необходимую точность посадки втулки на вал?

6

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Показатели надежности и работоспособности, заложенные на этапах проектирования и изготовления, должны поддерживаться при эксплуатации машин. В этот период ухудшается взаимосвязь между отдельными деталями вследствие их износа, изменяются первоначальные посадки и зазоры в сопряжениях, ослабляются крепления деталей в сборочных единицах и агрегатах. Все это приводит к увеличению динамических нагрузок и ухудшению условий смазки, росту скорости изнашивания, снижению эксплуатационных характеристик и, наконец, к полному отказу машины.

Между тем высокий уровень эксплуатационной надежности отдельной машины необходим для ее бесперебойной эксплуатации в составе комплектов и комплексов машин, связанных решением единой технологической задачи или обеспечением технологического процесса строительства, реконструкции, ремонта или содержания автомобильных и железных дорог.

Надежная эксплуатация машин опирается в основном на планово-предупредительную систему их технического обслуживания и ремонта, которая представляет собой комплекс положений и норм, определяющих организацию профилактических и ремонтных работ. Экономическая эффективность ремонтных мероприятий обусловлена существенной разницей затрат на производство и ремонт машин, их агрегатов, узлов и деталей. Затраты на капитальный ремонт машин составляют 40–60, агрегатов – 25–65, деталей – 15–70 % от стоимости новых машин, агрегатов и деталей соответственно.

В таблице 6.1 представлены сравнительные данные по ресурсосбережению на этапах производства и ремонта машин.

Таблица 6.1 – Расход ресурсов и затраты на производство и капитальный ремонт машин

Ресурсы, затраты	Производство	Капитальный ремонт
Металл, т	6,0–9,0	1,5–2,7
Электроэнергия, тыс. кВт·ч	4,0–5,5	1,2–2,2
Затраты труда, чел. ч	75–240	135–620
Основные фонды, тыс. руб. на машину	3,0–6,0	0,6–1,2

Видно, что все затраты, за исключением трудоемкости, при ремонте значительно меньше, чем при изготовлении. Увеличение трудоемкости обусловлено спецификой технологического процесса ремонта, который включает такие трудоемкие операции, как разборка, мойка, очистка, дефектация и восстановление. При этом затраты на материалы и комплектующие при производстве машин достигают 65–80 %, а при капитальном ремонте не превышают 20–40 %.

Практически любые сопряжения в процессе эксплуатации теряют первоначальные показатели, в том числе муфты, силовые передаточные механизмы (зубчатые, червячные, цепные и ременные передачи), муфты сцепления, тормоза (дисковые, конические и ленточные), бортовые фрикционы, элементы ходовой системы, шлицевые и шпоночные соединения, крепежные соединения и др.

В таблице 6.2 представлены сведения об отказах основных систем и агрегатов машин на предприятиях дорожно-строительного комплекса. Рабочие органы строительных, дорожных и других машин подвержены интенсивному абразивному износу, в их числе зубья и передние стенки ковшей одноковшовых экскаваторов, зубья, режущие кромки, ножи землеройно-транспортных машин, дробящие плиты дробильных машин и другие части машин, имеющие взаимодействие с разрабатываемым грунтом или обрабатываемыми (перерабатываемыми) материалами, а также детали ходовых систем машин. Поэтому наибольшее число отказов (более 36 %) приходится на рабочие органы. Износ элементов ходовых систем, привода агрегатов и узлов трения обуславливает значительное число отказов – около 35 %.

*Таблица 6.2 – Анализ надежности узлов и агрегатов строительных и дорожных машин**

Наименование систем, узлов и агрегатов	Отказы	
	количество	%
Рабочие органы	12622	36,21
Ходовая часть	4337	12,44
Привод агрегатов	4154	11,92
Узлы трения	3936	11,29
Металлоконструкции	3754	10,77
Гидросистема	3095	8,88
Электрооборудование	1246	3,58
Трансмиссия	1178	3,38
Пневмосистема	387	1,11
Двигатель	147	0,42
Всего	34856	100

* В организациях КПРСУП «Гомельоблдорстрой» за 6 лет.

Для узлов трения, защищенных от коррозии и абразивного износа, определяющим фактором снижения их работоспособности является усталостное изнашивание; для узлов трения, плохо защищенных от пылевидных твердых частиц, – абразивное, которое протекает значительно быстрее. В последнем случае абразивному изнашиванию подвергаются многие детали машин, образующие пары трения, в их числе подшипники, оси и валы, зубчатые передачи, опорные катки, а также другие сборочные единицы и сопряжения. При увеличении износа растут зазоры в подвижных сопряжениях, что вызывает увеличение динамических нагрузок, ухудшение условий смазывания и выход из строя узла трения. При этом следует отметить неравномерное изнашивание деталей, сопряжений, узлов и сборочных единиц. В строительных и дорожных машинах в результате больших силовых нагрузок (статических, динамических, знакопеременных) часто разрушаются металлоконструкции рабочих органов (стрел, рукоятей, ковшей, отвалов, рыхлителей и др.). Наиболее частой причиной разрушения сварных швов с последующим распространением трещин на основной металл являются внутренние напряжения или дефекты самого шва. Этот фактор также вносит значительный вклад в общее число отказов (более 10 %).

С учетом всего перечисленного очень важно поддерживать в период эксплуатации запланированный уровень надежности и работоспособности.

6.1 Основные направления повышения работоспособности

На *этапе эксплуатации* сохранение (а в некоторых случаях и повышение) надежности и работоспособности, заложенных при проектировании машины и реализованных при изготовлении, осуществляется как организационными мероприятиями, так и технологическими методами.

К организационным мероприятиям относятся:

1) *контроль соответствия* технических характеристик машин режимам их эксплуатации, в том числе контроль за использованием машин по назначению;

2) *совершенствование системы* планово-предупредительного ремонта машин;

3) *развитие системы* технического обслуживания и ремонта по фактическому техническому состоянию машин;

4) *оптимизация организации* технического обслуживания и ремонта машин, включая применение современных методов и средств технической диагностики;

5) *совершенствование* организации ремонта типовых деталей и механизмов машин;

6) *расширение сервисного* технического обслуживания и ремонта;

7) *повышение квалификации* и специальное обучение обслуживающего персонала.

К основным технологическим методам повышения надежности и работоспособности машин путем восстановления деталей машин, упрочнения и повышения их износостойкости относятся методы:

1) *удаления материала* с дефектной поверхности детали путем механической обработки (обточки, фрезерования, шлифования);

2) *наращивания* на изношенную поверхность детали другого материала (наплавкой металлических материалов, напылением металлических и полимерных покрытий, электрохимическим осаждением металлических покрытий);

3) *перемещения материала* детали с нерабочего участка к рабочему посредством пластической деформации (осадкой, раздачей, вытяжкой и накаткой);

4) *восстановления целостности* тела детали (сваркой, пайкой и склеиванием);

5) *восстановления относительного положения* поверхностей детали в пространстве (статическим нагружением, чеканкой, местным нагревом).

6.2 Совершенствование организации технического обслуживания и ремонта

Система технического обслуживания и ремонта включает средства технического обслуживания и ремонта, нормативно-техническую документацию, регламентирующую объемы и периодичность операций, а также обслуживающий персонал, которые в совокупности обеспечивают поддержание и восстановление исправности и работоспособности машин.

Основой обеспечения надежности функционирования машины является ее эксплуатация в соответствии с нормативно-технической документацией, в частности, точное соблюдение требований и рекомендаций, изложенных в руководствах по эксплуатации, подготовленных разработчиками и базирующихся на статистических исследованиях накопленного опыта эксплуатации машин соответствующего назначения.

Машина в процессе эксплуатации утрачивает свои первоначальные функциональные и параметрические характеристики. Поэтому бессмысленно пытаться достичь абсолютной надежности ее элементов. Гораздо более экономичной является реализация оптимальной надежности. Для этого при проектировании машины выявляют оптимальное распределение финансов, которые следует затратить на создание машины, т. е. конструирование и изготовление (с одной стороны) и на ее эксплуатацию, включая техническое обслуживание и ремонт (с другой).

Как уже отмечалось, на стадии эксплуатации обеспечение заданной надежности машин осуществляют за счет мероприятий, связанных с поддержанием и восстановлением работоспособности машин путем выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту машин. Эти меропри-

ятия регламентированы стандартами, в том числе стандартом ГОСТ 18322–78 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения», межгосударственным стандартом ГОСТ 25646–95 «Эксплуатация строительных машин», а также другими нормативными документами.

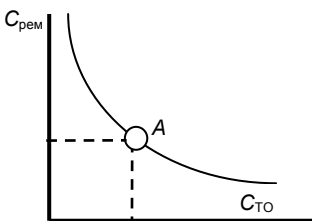


Рисунок 6.1 – Соотношение стоимости техобслуживания и стоимости ремонта машин

Существует функциональная зависимость (рисунок 6.1) между стоимостью технического обслуживания и стоимостью ремонтов и убытков от простоев (при высоком уровне организации снабжения запасными частями). На практике наблюдается тенденция увеличения затрат на техническое обслуживание. Их целесообразно увеличивать до размеров, сопоставимых с затратами на ремонт (что соответствует точке A): $C_{то} \approx C_{рем}$.

Организация работ по поддержанию работоспособности машин планируется на этапе проектирования и базируется на научно обоснованном прогнозировании потребности в профилактических мероприятиях. Их долгосрочное планирование (на год, сезон, квартал) осуществляют с использованием теории надежности, а краткосрочное – с учетом имеющихся методов и средств технической диагностики.

Техническим обслуживанием называют комплекс работ для поддержания исправности или работоспособности машины.

Профилактические работы включают такие мероприятия, как ежесменное (ЕО), периодическое (ТО) и сезонное (СО) техническое обслуживание. Все виды технического обслуживания проводят по плану с заданным объемом работ.

В состав ежесменного обслуживания входят следующие работы: заправка и смазка машины; проверка крепления узлов и деталей; контрольный осмотр с проверкой исправности двигателя, рабочих органов, ходовой системы, тормозов, механизмов управления, гидравлической, электрической и пневматической систем, освещения и др. ЕО проводит обслуживающий персонал до начала работы, в течение смены и после работы.

Наиболее ответственным видом профилактики является периодическое (или плановое) техническое обслуживание (ТО), которое предотвращает рост интенсивности потока отказов. Оно различается объемом, составом и трудоемкостью работ и включает первое (ТО-1), второе (ТО-2) и третье (ТО-3) техническое обслуживание. В состав периодического ТО входят следующие работы: внешний уход за машиной, включая очистку и мойку; осмотр и контроль технического состояния узлов и агрегатов; регулировка рабочих органов; контроль и регулировка гидравлической, электрической и пневматической систем управления; крепежные работы; смазка, замена рабочих жидкостей и др.

Сезонное обслуживание зависит от температуры окружающей среды: при установившейся температуре выше 5 °С его проводят для подготовки машин к весенне-летнему сезону, при температуре ниже 5 °С – к осенне-зимнему. Как правило, СО совмещают с проведением очередного планового ТО. При СО выполняют мелкие ремонтные работы, производят замену рабочих жидкостей, осуществляют контроль и регулировку агрегатов, узлов и системы управления.

При рассмотрении вопросов, связанных с совершенствованием технического обслуживания, следует выявить оптимальное сочетание таких характеристик, как периодичность и объем профилактических работ, число специалистов и время проведения с учетом стоимости технического обслуживания и числа отказов после проведения этих работ. Совершенствование системы технического обслуживания заключается в улучшении показателей, характеризующих его эффективность. К ним относятся трудоемкость (затраты труда на выполнение, чел·ч) и продолжительность техобслуживания (время его проведения, ч).

Ремонт (от франц. *remonte* – чинить) называют комплекс работ для восстановления исправности или работоспособности машины. Он включает совокупность организационных, технических и технологических мероприятий по устранению неисправностей и отказов, направленных на восстановление исправности или работоспособности машины в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. Целью ремонта является не только поддержание работоспособности, но и удлинение этапа эксплуатации жизненного цикла машины за счет поддержания и восстановления ее ресурса.

Научно обоснованная организация ремонта ставит конечной целью обеспечение запланированных на этапе проектирования показателей надежности и работоспособности путем проведения упомянутых мероприятий при минимальных затратах энергетических, материальных и трудовых ресурсов.

Ремонт классифицируют по следующим признакам:

- 1) *по планированию проведения* – плановый, неплановый и по фактическому техническому состоянию;
- 2) *по технологии выполнения* – агрегатный, поточный, методы специализированных и универсальных постов;
- 3) *по сохранению принадлежности ремонтируемых деталей и агрегатов* – обезличенный и необезличенный;
- 2) *по степени восстановления* – текущий, средний и капитальный;
- 3) *по структуре ремонтного предприятия* – заводом-изготовителем, специализированным ремонтным предприятием, предприятием-потребителем.

В учебнике [26] приведены следующие данные, свидетельствующие о причинах поступления машин в ремонт:

- в результате плановой безаварийной эксплуатации – 80–85 %;

- из-за внезапного изменения технического состояния – до 10 %;
- в результате аварий – 5–8 %.

Как видно из приведенных данных, в подавляющем большинстве случаев поступление машин в ремонт производится в плановом порядке. Неплановый ремонт проводят для устранения внезапных отказов и результатов аварийных ситуаций.

В профилактической системе технического обслуживания и ремонта имеется два критерия по определению необходимости проведения ремонта: во-первых, *по плановой наработке*, т.е. по достижению (выработке) машиной заданного норматива наработки; во-вторых, *по фактическому состоянию* агрегатов машины.

Традиционная планово-предупредительная система (ППС) технического обслуживания и ремонта по плановой наработке объединяет эксплуатацию и ремонт машин. Эту систему культивируют предприятия дорожно-строительного комплекса, Белорусской железной дороги и другие организации, которые разрабатывают годовой и месячные планы-графики технического обслуживания и ремонта машин, опираясь на запланированную для каждой машины наработку. В течение месяца график может корректироваться с учетом фактической наработки и технического состояния машины. При составлении планов рассчитывают потребности предприятия в трудовых и материальных ресурсах, в производственных площадях и оснащении ремонтных мастерских. Качественное проведение профилактических мероприятий обусловлено выполнением требований нормативно-технической документации, наличием подготовленных квалифицированных кадров по техническому обслуживанию и ремонту, материально-техническим обеспечением работ (технологическим оборудованием, оснасткой и инструментом, запасными деталями и агрегатами).

Профилактическое техобслуживание решает следующие задачи:

- обнаружение и корректировку предполагаемых отказов до их появления или развития в значительные отказы;
- снижение вероятности отказов;
- выявление имеющихся скрытых отказов.

Имеются сведения, что плановая замена агрегатов обеспечивает реализацию заложенного при проектировании ресурса только на 40–60 %. Вместе с тем в нашей стране эта система, разработанная еще во времена СССР, является основной на многих государственных предприятиях и на предприятиях других форм собственности.

Система профилактического обслуживания и ремонта, основанная на *оценке фактического состояния* агрегатов и узлов машины, заключается в периодическом или непрерывном контроле параметров, определяющих тех-

ническое состояние машины. По результатам контроля определяют объем и сроки проведения профилактических и ремонтных работ. Ремонт проводят в тех случаях, когда значения оценочных параметров значительно отличаются от допустимых. Анализ технического состояния машины проводят с использованием методов технического диагностирования.

Диагностирование машины – это определение ее технического состояния и возможности дальнейшей эксплуатации без разборки узлов и агрегатов. При этом диагностирование позволяет обеспечить более высокое качество технического обслуживания и ремонта. Использование современных диагностических средств снижает стоимость проверки основных агрегатов машин на 70–75 % по сравнению с традиционными способами с частичной разборкой узлов и агрегатов. Кроме того, техническая диагностика способствует повышению эффективности использования машин за счет уменьшения времени простоев при техническом обслуживании и ремонте. Проведение профилактических ремонтных мероприятий в соответствии с их действительной потребностью существенно снижает затраты на ремонт по сравнению с профилактикой по плановой наработке.

Ведущие западные и отечественные компании по производству машин, имеющие ремонтные подразделения, в основном реализуют с потребителями своей продукции систему фирменного технического обслуживания и ремонта по результатам диагностирования технического состояния машин.

Между тем в условиях рыночной экономики сформированы рыночные отношения между ремонтными предприятиями и потребителями. Наличие у потребителей машиностроительной продукции различной по назначению и сложности конструкции техники, а также спрос на ее обслуживание и ремонт сформировало довольно широкий круг ремонтных предприятий или ремонтных служб с различной формой собственности. Наряду с предприятиями, продолжающими реализовывать планово-предупредительную систему технического обслуживания и ремонта собственными силами, имеются самостоятельные ремонтные организации, которые осуществляют продажу и реализацию различных видов технического обслуживания и ремонта. В их числе предприятия, выполняющие фирменный ремонт своей продукции, подразделения, специализирующиеся по видам ремонта или по маркам (моделям) машин, а также частные ремонтные мастерские, выполняющие ремонт в небольших объемах.

Основным методом ремонта машин является агрегатный, который представляет собой *обезличенный ремонт*. Неисправные узлы и агрегаты заменяют новыми или предварительно отремонтированными (из оборотного фонда), что значительно сокращает продолжительность ремонта и сроки ввода машины в эксплуатацию.

Возможности *необезличенного ремонта* значительно меньше, поскольку неисправные узлы и агрегаты снимают, ремонтируют и ставят на ту же са-

мую машину. Это увеличивает продолжительность ремонта, поэтому такой метод используют в редких случаях.

На рисунке 6.2 показана типичная схема технологического процесса капитального необезличенного ремонта машины.

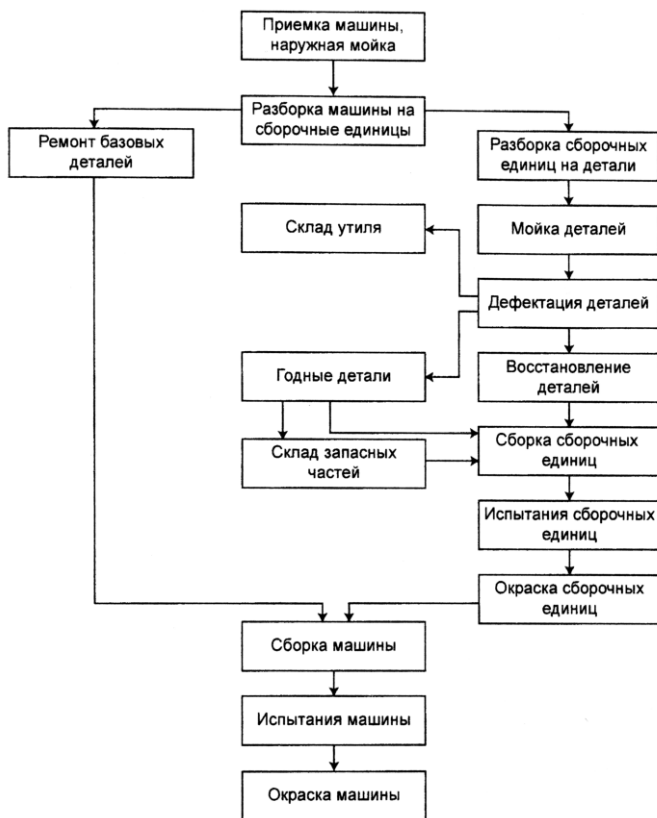


Рисунок 6.2 – Схема капитального ремонта машины

Поточный метод представляет собой ремонт машины с последовательным выполнением ремонтных операций на специализированных постах. Машину (или агрегат) ремонтируют в оптимальной последовательности операций, передавая ее от одного специализированного поста к другому после выполнения очередной операции. Этот метод применяют на крупных специализированных ремонтных предприятиях с большим объемом работ по капитальному ремонту, поскольку он обеспечивает высокую производительность ремонтных работ и эффективное использование технологического оборудования.

Метод специализированных постов представляет собой ремонт машины, проводимый бригадами, которые специализируются на выполнении ремонта однотипных узлов и агрегатов или восстановления однотипных деталей. Этот метод применяют в основном при среднем ремонте машин с использованием готовых агрегатов.

Метод универсальных постов представляет собой ремонт машины, который проводят на одном рабочем посту одной бригадой, что требует высокой квалификации ее членов, выполняющих различные виды работ. Результатом является относительно низкая производительность метода по сравнению с методом специализированных постов.

Как было отмечено, различают текущий, средний и капитальный ремонты. Текущий ремонт разделяют на две категории: плановый и явочный (неплановый). *Плановый текущий ремонт* (ТР) осуществляют в объеме и в сроки, установленные заводом-изготовителем. Его называют регламентированным и проводят для поддержания работоспособности машины с восстановлением или заменой отдельных деталей, узлов и агрегатов (кроме базовых). В состав ТР входят частичная разборка и дефектация, а также проведение необходимых регулировочных и ремонтно-восстановительных работ. При текущем ремонте выполняют работы, предусмотренные периодическим техобслуживанием, а также производят осмотр всех узлов и агрегатов.

Явочный текущий ремонт проводят для устранения или предупреждения случайного отказа. В ряде случаев он носит аварийно-восстановительный характер после аварийного отказа машины.

Средний и капитальный ремонты являются плановыми и проводятся в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

Средний ремонт (СР) осуществляют для поддержания работоспособности машины и частичного восстановления ресурса машины после замены или ремонта изношенных деталей, узлов и агрегатов. СР включает частичную разборку машины, дефектацию, капитальный ремонт отдельных сборочных единиц, восстановление или замену основных изношенных деталей, сборку, регулировку и испытания. Как правило, средний ремонт проводят после выработки 60 % ресурса машины.

Капитальный ремонт (КР) проводят для восстановления работоспособности машины до нормативного уровня. При этом обновленный ресурс должен составлять не менее 80 % ресурса новой машины. Машину (или ее агрегат) направляют на КР на основании результатов оценки ее технического состояния с учетом наработки с момента начала ее эксплуатации. При этом учитывают стоимость израсходованных запасных частей и других затрат на текущий ремонт.

КР осуществляют в основном на специализированных ремонтных предприятиях. Он предусматривает полную разборку машины или агрегата, дефектацию, восстановление или замену всех изношенных деталей и сборочных единиц, включая базовые детали и сборочные единицы, сборку, регулировку и испытания. Агрегат направляют в КР в следующих случаях: во-

первых, если базовая и основные детали агрегата требуют ремонта с полной разборкой агрегата; во-вторых, если работоспособность агрегата не может быть восстановлена с помощью ТР; в-третьих, если восстановление агрегата путем ТР экономически нецелесообразно. В качестве примера в таблице 6.3 представлены некоторые агрегаты привода ходового оборудования машины, а также их базовые и основные детали.

Таблица 6.3 – Агрегаты привода ходового оборудования

Агрегат	Базовая (корпусная) деталь	Основные детали
Двигатель с картером сцепления в сборе	Блок цилиндров	Коленчатый вал, маховик, картер сцепления
Коробка передач	Картер коробки передач	Входной, промежуточный и выходной валы
Задний мост	Картер заднего моста	Кожух полуоси, картер редуктора, стакан подшипника, чашка дифференциала, ступица колеса
Передняя ось	Балка передней оси	Поворотная цапфа, колесо
Рулевое управление	Картер рулевого управления	Вал сошки, червяк, рейка

Как правило, текущий и средний ремонты проводят на предприятии-потребителе с использованием его ремонтных служб. Средний и капитальный ремонты проводят на специализированных предприятиях. Все виды ремонта и технического обслуживания осуществляют на заводе-изготовителе (фирменный ремонт).

Работы по восстановлению работоспособности машин при ремонте сопровождаются значительными энерго-, трудо- и материальными затратами. Поэтому повышение их эффективности должно базироваться на экономически обоснованном подходе к подготовительным работам, техническому диагностированию, выбору технологий восстановления деталей и узлов, обеспечению запасными частями. Последовательность, объем и характер ремонтных работ зависят от наличия в машинах однотипных силовых установок и агрегатов, блочно-модульных конструкций, а также унифицированных деталей и конструктивных элементов.

В таблице 6.4 приведено распределение трудоемкости различных видов работ при капитальном ремонте машины в целом и двигателя. Как видно из таблицы, наиболее трудоемкими являются операции восстановления деталей, а также сборочные работы.

Специфика отрасли или предприятия отражается на объеме и характере ремонта. Для примера приведем ремонт специального самоходного подвижного состава (ССПС), т.е. путевых машин, который используют на Белорусской железной дороге. На предприятиях дороги (в соответствии со стандартом предприятия СТП 09150.56.136–2010) применяют следующие виды ремонта ССПС: текущий, средний, капитальный и капитально-восстановительный.

Таблица 6.4 – Трудоемкость операций капитального ремонта

Вид работ	Трудоемкость при ремонте, %	
	машины	двигателя
Разборка	8–9	5–7
Мойка	3–5	2–3
Дефектация	< 2	< 2
Восстановление деталей	32–38	35–44
Ремонт электрооборудования	4–7	2–5
Изготовление деталей	6–8	4–7
Комплектация	< 1,5	< 1,5
Сборочные работы	25–28	26–34
Испытания всех видов	4–8	5–9
Комплектация и сдача	< 3	< 4

Текущий ремонт ССПС выполняют для обеспечения или восстановления их работоспособности. Он состоит в восстановлении или замене отдельных деталей, узлов и агрегатов и производится на предприятии приписки ССПС с привлечением при необходимости специалистов других организаций. При текущем ремонте выполняются все работы, предусмотренные периодическим ТО. Кроме того, производится осмотр всех узлов и агрегатов, включая металлоконструкцию, рабочие органы, грузоподъемное оборудование, привод, ходовую систему, тормозное оборудование, автосцепное устройство, пневматическую, гидравлическую и электрическую системы и др., а также регулировка и настройка всех регулируемых соединений, проверка всех контрольно-измерительных приборов. При выявлении неисправностей восстанавливают или производят замену отдельных деталей, узлов и агрегатов.

Средний ремонт выполняют для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса ССПС с восстановлением или заменой составных частей ограниченной номенклатуры и контролем технического состояния составных частей. К основным работам при проведении среднего ремонта относятся: частичная разборка ССПС, мойка демонтированных деталей, узлов и агрегатов, их дефектация и ремонт; капитальный ремонт рабочих органов, выкатка и ремонт ходовых тележек, освидетельствование колесных пар, промежуточная ревизия буксовых узлов; демонтаж и ремонт приборов тормозного оборудования; демонтаж и ремонт автосцепного устройства; демонтаж и проверка электрических и гидравлических аппаратов; техническое обслуживание системы обеспечения безопасности движения и контрольно-измерительной аппаратуры. При необходимости производится замена деталей, узлов и агрегатов.

Капитальный ремонт выполняют для восстановления исправности и полного восстановления ресурса ССПС с заменой или восстановлением любых составных частей, включая базовые. К основным работам при проведении капитального ремонта относятся: полная разборка машины (за исключением клепаных, сварных и клееных конструкций); очистка, мойка и дефектация сбороч-

ных единиц и деталей; восстановление посадок и сопряжений; проверка геометрических размеров рамы; капитальный ремонт или замена комплектующих изделий и агрегатов; полная замена электрических и гидравлических аппаратов, контрольно-измерительных приборов, тепло- и звукоизолирующих материалов кабины; выкатка и ремонт ходовых тележек, полное освидетельствование или замена колесных пар; демонтаж и ремонт приборов тормозного оборудования; демонтаж и ремонт автосцепного устройства; техническое обслуживание системы обеспечения безопасности движения.

Капитально-восстановительный ремонт выполняют для продления срока использования ССПС и проводят после истечения планового срока использования машины. При капитально-восстановительном ремонте помимо работ, выполняемых при капитальном ремонте, дополнительно проводят инструментальные измерения несущих конструкций ССПС (рамы, фермы, ходовых тележек, металлоконструкций, рабочих органов и грузоподъемных механизмов), а также при необходимости – их дефектоскопию. На основании проведенных обследований разрабатывают конструктивные решения по усилению конструкции ССПС, проводят модернизацию машины по конструкторской документации и после проведения испытаний устанавливают сроки дальнейшей эксплуатации ССПС.

В общем случае в процессе эксплуатации машины ее технические характеристики снижаются, ухудшается качество производимых работ и уменьшается эксплуатационная производительность. В результате машина достигает предельного состояния и становится непригодной для дальнейшей эксплуатации. Одновременно происходит ее экономическое обесценивание (предполагая уменьшение ее экономических показателей, так как они переносятся на вырабатываемую продукцию). При ремонте в машину вкладываются и расходуются дополнительные экономические ресурсы (ΔC), в результате чего частично или полностью восстанавливаются потребительские свойства машины (ΔG). На рисунке 6.3 в общем виде представлены кинетические зависимости экономических показателей, включая расходы на ремонт, и потребительских характеристик машины [20].

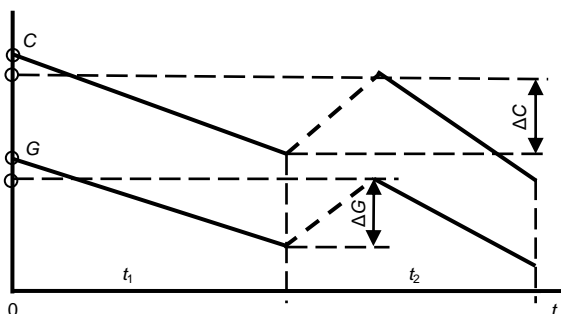


Рисунок 6.3 – Зависимость экономических показателей (C) и потребительских свойств (G) машины от времени наработки:
 t_1, t_2 – наработка до первого и второго ремонтов

При эксплуатации машины с ростом потребности в ремонтных работах увеличиваются затраты на их выполнение. При этом может наступить такой момент, когда расходы на поддержание машины в работоспособном состоянии, включая ремонт, могут превысить экономию, достигаемую за счет сокращения отчислений на амортизацию. В этом случае при определении экономически оправданного срока службы машины учитывают два основных фактора: во-первых, экономическое обесценивание в процессе эксплуатации; во-вторых, увеличение расходов на поддержание работоспособного состояния машины. Эти соображения лежат в основе оценки экономически оправданного срока службы машины, предложенной в работе [20].

Как было отмечено, конкурентоспособность машины на современном рынке обусловлена высоким уровнем безопасности (в том числе экологической) и эргономики, повышенной надежностью узлов и агрегатов, низкими удельными показателями энерго- и металлоемкости, автоматизацией технологического процесса и высоким качеством производимых работ. Поэтому можно предположить, что рост начальной стоимости машины должен обеспечивать увеличение срока ее службы.

Для определения срока службы машины до ее списания целесообразно использовать общий расход ресурсов на ее эксплуатацию с учетом упомянутых допущений. Суммарные затраты ресурсов на эксплуатацию машины $\sigma(t)$ включают отчисления на восстановление первоначальной стоимости (амортизация на возобновление машины); дополнительные затраты на доставку и монтаж машины; стоимость сменных элементов (деталей, сборочных единиц); затраты, обусловленные старением и износом машины, а также другие расходы.

Если предположить, что замена машины равносильна ее восстановлению до первоначального состояния, то основные суммарные затраты на эксплуатацию составят

$$\sigma = \frac{1}{t} [C + \Delta C - \delta] K (1 - e^{-\delta t}), \quad (6.1)$$

где C – стоимость новой машины с учетом ее доставки и монтажа, руб.;

ΔC – стоимость годных для использования и восстановления деталей машины в момент ее списания, руб.;

δ – ликвидационная цена старой машины (негодных деталей), руб.;

K – приращение (увеличение расхода ресурсов на поддержание машины в работоспособном состоянии (руб./год², руб./мото · ч² или др.);

t – срок службы машины в единицах времени (год, час) или работы (пробег в км, мото · ч, объем грунта в м³, количество циклов и др.).

Анализ выражения (6.1) показывает, что первое слагаемое с ростом t уменьшается, а второе – растет (чем больше t , тем больше расходы K). По-

этому машину целесообразно эксплуатировать до тех пор, пока формула (6.1) не примет минимальное значение, т.е.

$$\frac{d\sigma}{dt} = 0, K - \frac{C + \Delta C - \delta}{t^2} = 0.$$

Тогда экономически оправданный срок службы машины

$$t_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{C + \Delta C - \delta}{K}}. \quad (6.2)$$

Стоимость машины C включает ее цену, а также стоимость ее перевозки потребителю; стоимость годных и подлежащих восстановлению деталей списываемой машины определяют по формуле

$$\Delta C = (C_{\text{заг}}^{\text{H}} - C_{\text{заг}}^{\text{B}}) \beta + C_{\text{годн}},$$

где $C_{\text{заг}}^{\text{H}}, C_{\text{заг}}^{\text{B}}$ – затраты предприятия на заготовку деталей (новых и восстановленных до кондиции), руб.;

β – коэффициент учета утраты годности детали к восстановлению по сравнению с заготовкой новой детали;

$C_{\text{годн}}$ – стоимость годных для повторного использования деталей машины, подлежащей списанию.

Анализ затрат на единичный ремонт показывает, что в общей стоимости капитального ремонта издержки на приобретение дефицитных, но поддающихся восстановлению деталей составляют до 50 %, что в среднем соответствует 25–35 % стоимости единичного капитального ремонта машины. В этом случае ликвидационная цена списываемой машины составляет не более 10 % цены новой машины. Приращение затрат K зависит от многих факторов (качества ремонта, условий эксплуатации, типа машин и др.).

По формуле (6.2) можно приближенно оценить плановый срок службы машины, хотя действительные сроки могут значительно отличаться от плановых.

Технологический процесс ремонта машины является частью производственного процесса. Он состоит из ряда операций и видов работ, которые по-разному связаны между собой. Различают ремонт трех видов: с последовательным, параллельным и комбинированным проведением операций.

Ремонт с *последовательным проведением операций* (операции выполняют одна за одной в заданной последовательности) применяют только в индивидуальном производстве. Его особенностями являются довольно низкий уровень эффективности, большой простой машины в ремонте и ограниченные возможности применения высокопроизводительного оборудования.

Ремонт с *параллельным проведением операций* (выполняемых одновременно), применяют только в массовом производстве. Его особенностью является соответствие числа рабочих постов и объектов ремонта числу технологических операций при одинаковой длительности различных операций. Следует отметить, что при ремонте дорожных и строительных машин затруднительно использовать эту схему.

Ремонт с *комбинированным проведением операций* является наиболее предпочтительным при ремонте дорожных и строительных машин. Он совмещает параллельное и последовательное проведение операций. На рисунке 6.4 представлена структура ремонта, которая образована из обобщенных операций 1–5, расположенных последовательно. Каждую из них при необходимости можно разбить на более мелкие. В качестве примера операция 3 разбита на подоперации 3.1–3.5, которые можно проводить в параллельном режиме.

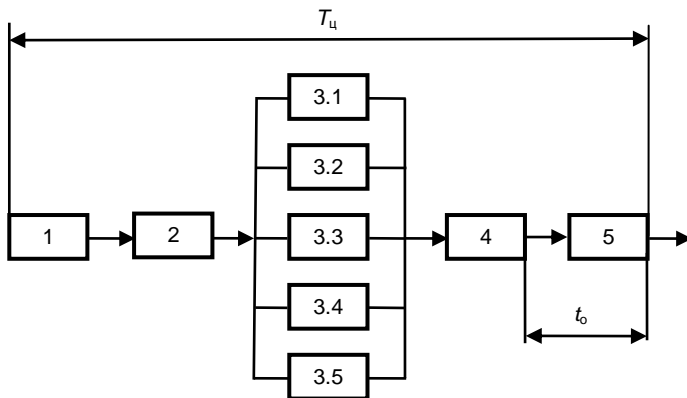


Рисунок 6.4 – Ремонт с комбинированным проведением операций:

t_0 – время операции; $T_{ц}$ – время цикла;

1 – подготовка к ремонту; 2 – разборка, мойка, очистка; 3.1 – контроль, 3.2 – комплектование, 3.3 – восстановление, 3.4 – изготовление деталей, 3.5 – сборка узлов; 4 – сборка машины из узлов и агрегатов; 5 – обкатка, испытания и контроль машины

Изменение структуры ремонта, сокращение времени на проведение операции за счет перехода на параллельное проведение подопераций ускоряет процесс ремонта и повышает эффективность использования оборудования. Это влияет на временные параметры процесса ремонта, в частности на величину *цикла* (интервала времени от начала первой до конца последней операции).

Для ремонта с последовательным проведением операций время цикла

$$T_{ц} = t_{01} + t_{02} + \dots + t_{0m} = \sum_{i=1}^m t_{0i} ,$$

где t_{oi} – время технологической операции;

i – число операций.

Для ремонта с комбинированным проведением операций время цикла меньше:

$$T_{\text{кц}} = T_{\text{ц}} - \sum_{p=1}^{n-1} t_p,$$

где $T_{\text{кц}}$ – время цикла при комбинированной системе;

t_p – время технологической операции, выполняемой параллельно с другими;

p – число параллельных операций.

Эффективность использования оборудования и производственных площадей зависит от структуры ремонта и времени цикла. При выборе технологии ремонта сопоставляют время цикла и коэффициент параллельности.

Эффективность комбинированного проведения операций оценивают коэффициентом параллельности

$$K_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{кц}}}{T_{\text{ц}}}.$$

В схеме ремонта, представленной на рисунке 6.4, основные операции ремонта можно разделить на более мелкие элементы и перевести в параллельную систему. В частности, операцию 1 – подготовка к ремонту – можно разделить на следующие подоперации: 1.1 – приемка машины в ремонт; 1.2 – хранение принятой в ремонт машины; 1.3 – снятие с машины некоторых деталей; 1.4 – внешняя мойка машины.

Операцию 2 – разборка машины – также можно разбить на подоперации: 2.1 – разборка машины на агрегаты, узлы и детали; 2.2 – мойка и очистка деталей; 2.3 – контроль состояния деталей и их сортировка; 2.4 – комплектование деталей и т.д.

Эти операции отличаются различной технологической общностью. Некоторые из них (приемка, мойка, очистка, сборка и разборка) выполняют при ремонте различных машин и агрегатов. Отдельные операции (по восстановлению работоспособности агрегатов и узлов) являются специфическими и требуют специальных технологий и оборудования.

Важным звеном обеспечения работоспособности машин является *сервисное техническое обслуживание* предприятием-изготовителем, которое проводится в течение всего жизненного цикла машин. Оно основано на комплексном подходе к проблеме поддержания работоспособности машин, который включает техническую диагностику и ремонтные работы, снабжение запасными частями и эксплуатационными материалами, обеспечение технической документацией и оснащение современным диагностическим оборудованием.

Сервисное техническое обслуживание давно приобрело широкие масштабы в странах с развитым машиностроением. Это обусловлено причинами как техническими, так и экономическими. В числе технических причин широкое применение в машинах сложных агрегатов и систем их управления (многозвенных комбинированных приводов, содержащих механические, гидравлические и электрические передачи; электрогидравлических тормозных систем; электронных систем управления агрегатами и рабочими органами машины). Главной экономической причиной является конкурентная борьба за рынок сбыта машиностроительной продукции. Известное соотношение «цена – качество продукции» ведущие машиностроительные предприятия давно дополняют еще одним компонентом: «цена – качество продукции – качество обслуживания». Соответственно, сервисное фирменное обслуживание является синонимом высокого качества, поскольку ведущие производители эффективно используют мировой опыт конкурентоспособных технологий технического обслуживания и ремонта строительной, дорожной, подъемно-транспортной и другой техники.

Оно реализуется как на фирменных ремонтных предприятиях компаний по производству машин, так и в специализированных фирмах-дилерах, связанных с этими компаниями на договорной основе, которые снабжают их запасными частями, поставляют фирменное диагностическое оборудование, проводят обучение обслуживающего персонала и т.д. Кроме того, работы по сервису осуществляют через филиалы предприятий-производителей посредством консорциума фирм-поставщиков отдельных узлов машин и оборудования, а также предприятиями-потребителями под активным патронажем производителей машин и оборудования.

Ведущие производители машин постоянно совершенствуют состав и качество предоставляемых услуг. Они (услуги) охватывают весь спектр мероприятий, обеспечивающих качественную эксплуатацию техники: организационных, правовых, материаловедческих, конструктивных, технических и технологических. В их числе комплексное техническое обслуживание машин, которое минимизирует удельные затраты (на единицу продукции) за счет:

- качественного диагностирования и ремонта машин с привлечением высококвалифицированных специалистов;
- использования комплекса фирменного специального оборудования и высокотехнологичных ремонтных технологий;
- осуществления специальных программ проверки технического состояния машин;
- высококачественного технического обслуживания, имеющего предупредительный характер: а) путем применения специального программного обеспечения по планированию и контролю проведения обслуживания; б) за счет принятия решения по ремонту на основе анализа состояния смазочных материалов, гидравлических и охлаждающих жидкостей.

В состав фирменных услуг входят также специальное обслуживание гидравлических систем с периодическим диагностированием состояния систем с помощью анализа чистоты рабочих жидкостей, ремонтом и испытаниями элементов гидросистем, что способствует достижению максимальной производительности; специальное обслуживание привода машин, включая двигатель и силовые передачи, которое обеспечивает реализацию всех потенциальных возможностей привода с минимальными затратами за счет планирования ремонта или замены элементов привода, исходя из их технического состояния, а также применения отремонтированных элементов, имеющих такую же гарантию, как новые элементы, но более низкую цену; специальное обслуживание ходовых систем (гусеничных и пневмоколесных), обеспечивающее минимальные эксплуатационные затраты за счет периодического диагностирования их элементов и достоверного прогнозирования их срока службы.

В числе фирменных услуг – предоставление широкой гаммы сменного рабочего оборудования машин для земляных, дорожных, строительных и других работ, в том числе по спецзаказам, а также элементов ходовых систем; обеспечение высококачественными запасными частями, способствующее минимальным простоям техники, – при экстренной доставке запасная часть отгружается в течение 1–3 часов после получения заказа; продажа капитально отремонтированных по специальной программе машин, имеющих новый серийный номер и такую же гарантию, как у новой машины, но более низкую цену; предоставление машин и оборудования в аренду на арендных предприятиях, связанных с фирмами-изготовителями контрактами, как в виде комплексов и комплектов, так и отдельными машинами с предоставлением широкого набора фирменных услуг по их техническому обслуживанию и ремонту.

Сервисное фирменное обслуживание предопределяет высокий уровень готовности машины к работе и высокую эффективность эксплуатации машины под постоянным надзором изготовителя. При этом фирменная система технического обслуживания накладывает и высокий уровень ответственности за результаты работы, включая качество запасных частей и эксплуатационных материалов, уровень подготовки технической документации, строительство баз по обслуживанию и ремонту, создание учебных центров для обслуживающего персонала, анализ эффективности работы машин в различных эксплуатационных условиях. Все это является свидетельством того, что в развитых странах сервисное обслуживание сформировалось в самостоятельную отрасль экономики, которая имеет значительные прибыли, но и такую же степень ответственности. Об эффективности фирменного сервиса свидетельствуют следующие цифры: в США поставки запасных частей машин потребителям осуществляют в течение суток более 80 % фирм, в течение двух суток – остальные 20 %.

Наличие разветвленной сети сервисных центров и контроль производителя над системой технического обслуживания позволяет оперативно устранять дефекты, заложенные на этапах проектирования и изготовления и обнаруженные в уже поступивших в продажу машинах. Развитие дилерской сети характеризуется все большим приближением технического обслуживания к месту эксплуатации машин и его оперативностью.

Технический сервис и фирменное обслуживание позволяют предприятиям-изготовителям напрямую получать достоверную информацию по статистике отказов, а также по эффективному использованию техники с учетом эксплуатационных факторов. Такая информация необходима для организации выпуска машин с оптимальными параметрами, особенно при разработке и освоении перспективных моделей.

6.3 Диагностирование машин

Диагностированием называют оценку технического состояния машины и ее сборочных единиц без разборки.

К основным задачам диагностирования относятся:

- проверка работоспособности сборочных единиц и машины в целом;
- выявление дефектов, которые могут быть причиной отказов;
- оценка потребности выполнения контрольно-регулирующих операций и ремонтных работ при техническом обслуживании;
- сбор и обработка информации для прогнозирования остаточного ресурса машины.

Техническое состояние машины определяют по ряду диагностических параметров, которые выбирают в зависимости от назначения машины, метода и средств диагностирования. Для каждой сборочной единицы определяют методы и средства диагностирования, которые дают достоверную информацию и позволяют наиболее точно определить ее техническое состояние. Однако набор диагностических параметров и объем работ по оценке технического состояния машины, как правило, зависят от технико-экономических возможностей предприятия.

Диагностические признаки, которые используют в качестве параметров технического состояния машин и их сборочных единиц, могут быть геометрическими (размеры и форма деталей, зазоры в сопряжениях, линейные и угловые перемещения), кинематическими (скорости, ускорения, вибрации и др.), силовыми (давление жидкости или газа, механические усилия, крутящие моменты), временными (промежутки времени на выполнение операций), тепловыми (температура на поверхности детали, температура жидкости) и др.

Диагностирование является составной частью системы технического обслуживания и ремонта машин, обеспечивая ресурсосбережение при прове-

дении этих работ по фактическому техническому состоянию машин. На основании анализа технического состояния машины и результатов диагностики определяют вид и объемы работ по техническому обслуживанию и ремонту машин и их сборочных единиц, а также осуществляют контроль за устранением обнаруженных неисправностей.

Методы диагностирования классифицируют по следующим признакам:

1) *по способу диагностирования* – визуальное (внешний осмотр) и инструментальное (при помощи специального оборудования и приборов);

2) *по типу параметров* – прямые (структурные) и косвенные (функциональные);

3) *по виду средств диагностирования* – внешние и встроенные;

4) *по способу планирования* – плановое, по потребности и ресурсное.

Визуальное диагностирование, т.е. внешний осмотр, дает качественную характеристику состояния машины и ее сборочных единиц. В процессе осмотра выявляют видимые повреждения несущих металлоконструкций рабочих органов, состояние уплотнений и креплений (по подтеканию рабочих жидкостей), состояние привода (по наличию вибрации, шума, задымленности, перегрева и т.п.). В результате внешнего осмотра можно обнаружить такие дефекты металлоконструкций рабочего оборудования (рам, стрел, рукоятей, отвалов, толкающих брусьев и др.), как прогибы, скручивания, пробоины, трещины, износ и задиры поверхностей посадочных отверстий; в корпусных деталях – пробоины, обломы и изломы, трещины в стенках и в сварных швах, коробления; в ходовых системах – обломы и трещины в ребордах колес, опорных и поддерживающих катках, износ реборд и поверхностей качения; в зубчатых передачах трансмиссий – изломы, изгибы и износ валов, обломы, выкрашивания и трещины на зубьях, их износ по толщине, а также другие видимые дефекты сопряжений в системе «вал – отверстие», шлицевых и шпоночных соединений, резьбовых и конических соединений и др.

Инструментальное диагностирование осуществляют при помощи внешних и встроенных средств диагностирования. В результате определяют параметры (прямые и косвенные) технического состояния машины и ее сборочных единиц, измеряют их показатели и сравнивают со значениями параметров, установленных нормативно-технической документацией на машину. Если фактические значения параметров не соответствуют паспортным данным (нормативным характеристикам), диагностируемый объект подлежит регулировке или замене.

К *прямым параметрам* можно отнести: во-первых, *выходные характеристики машины* – усилия, развиваемые на рабочем органе, величину крутящего момента на выходном валу и частоту его оборотов, скорости рабочие и транспортные, подачу гидронасоса, силу тока и напряжение в электроприводе

и др.; во-вторых, *характеристики деталей и сборочных единиц* – размерную точность деталей, отклонения формы и расположения их поверхностей, зазоры и натяги в сопряжениях.

Изменение параметров, непосредственно характеризующих работоспособность составных частей машин (зазоры, натяг, размерная точность деталей и др.), как правило, связано с износом и усталостным разрушением деталей.

К *косвенным параметрам* относятся расход энергии и топлива, эффективная мощность, давление в главной магистрали двигателя и в гидросистеме, температура масла, уровень вибрации и шума, загазованность и т.п. Их используют для определения технического состояния машины и работоспособности ее составных частей без разборки машины.

Внешние средства диагностирования в свою очередь разделяют на *переносные, передвижные и стационарные*. Их подключают к объекту диагностирования только для оценки его состояния. Контроль состояния деталей и сборочных единиц машины оценивают универсальными и специальными методами.

Встроенные средства составляют с машиной конструктивно единое целое и дают возможность постоянно получать необходимую информацию о техническом состоянии машины. В состав встроенных в машину средств входят различные элементы – датчики, индикаторы, приборы и др. В их числе термодатчики для контроля температуры, устройства для измерения крутящего момента на выходном валу и частоты его вращения, скорости перемещения машины, виброизмерительная аппаратура для контроля амплитуды и частоты колебаний, приборы для измерения и анализа шума и т.п. Кроме того, современные машины оснащают бортовыми компьютерами и системами автоматического управления.

Плановое диагностирование проводят после отработки машиной установленного количества моточасов. Результатом является определение потребности сборочных единиц и машины в целом в техническом обслуживании или ремонте, а также в объемах этих работ. Как правило, плановое диагностирование совмещают с техобслуживанием или ремонтом.

Диагностирование по потребности проводят при появлении неисправности машины и необходимости установления причины ее возникновения.

Ресурсное диагностирование проводят при назначении сроков постановки машины на текущий, средний и капитальный ремонты, а также при ТО-3.

Диагностирование в основном совмещают с выполнением технического обслуживания. Его осуществляют на специализированных участках или постах предприятий при наличии соответствующего диагностического оборудования, в частности, переносных диагностических комплектов. Такой

переносной комплект может содержать набор измерительных инструментов, состав которого зависит от конструкции диагностируемого объекта. В их числе могут быть микрометры и штангенциркули, нутромеры и штангенглубиномеры, диаметромеры зубчатых колес и измерительные зубчатые колеса, толщиномеры и длинномеры, калибры и индикаторы, щупы, тахометры и частотомеры, динамометры, дозиметры. Для более углубленного диагностирования такие комплекты могут быть дополнены установками для оценки остаточных свойств материалов деталей (в частности, твердости металлов и сплавов деталей, выносливости стальных конструкций); стендами для измерения различных параметров (мощности двигателей, расхода топлива и картерных газов); установками для регулирования топливной аппаратуры и испытания гидрооборудования, приборами для испытания и регулирования электрооборудования и др.

Передвижные комплекты могут оснащаться необходимым диагностическим оборудованием для проверки машин и их сборочных единиц на местах их эксплуатации во время проведения технического обслуживания.

Для оценки технического состояния сборочных единиц и машины в целом используют и другие инструментальные методы и средства диагностики, в их числе стадопараметрический, переходных характеристик и амплитудно-фазовых характеристик, временной, силовой, виброакустический, тепловой, анализа состояния жидкости, радиационный, электрический, нефелометрический и др. Некоторые из них имеют практическое применение.

Стадопараметрический метод основан на измерении давления, а также подачи или расхода рабочей жидкости. Он позволяет оценить объемный КПД и определить целесообразность дальнейшей эксплуатации диагностируемой сборочной единицы. Для проведения испытаний и подключения датчиков необходимо разъединение трубопроводов и рукавов.

Метод переходных характеристик заключается в измерении падения давления при отключении подачи воздуха или рабочей жидкости, по скорости падения которого судят о работоспособности пневмо- и гидропривода, в частности, об их герметичности. Его реализуют с помощью накладных и встроенных датчиков с применением специального оборудования.

Метод амплитудно-фазовых характеристик основан на анализе волновых процессов изменения давления рабочей жидкости в напорной магистрали гидропривода при нагружении рабочего органа и в сливной при дросселировании рабочей жидкости. Для его реализации используют накладные или встроенные датчики.

Временной метод состоит в измерении параметров движения машины или ее рабочего органа в условиях нормированных режимов нагружения. Он позволяет оценить работоспособность гидропривода различных агрегатов и машины в целом по времени отдельной операции. Например, по вре-

мени подъема ковша погрузчика от начального до предельного положения оценивают работоспособность гидропривода рабочего оборудования, по времени перемещения управляемых колес из одного в другое крайнее положение – работоспособность гидропривода рулевого управления и т.д. Для реализации метода не требуется установка датчиков.

Силовой метод основан на определении диагностического параметра по величине усилия на рабочем органе или на движителе. Используя специальные нагрузочные стенды, оценивают работоспособность машины в целом на режимах, приближенных к реальным рабочим или транспортным режимам.

Виброакустический метод основан на анализе параметров вибраций и акустических шумов, исходящих от различных сборочных единиц машины. По изменению характера вибрации или шума, по изменению амплитуды сигналов оценивают работоспособность диагностируемого объекта. Метод обладает большой информативностью, но требует специального оборудования и специально обученного персонала.

Тепловой метод состоит в оценке распределения температуры на поверхности сборочной единицы, а также в определении разности температур рабочей жидкости на входе и выходе гидросистемы. Для его реализации используют высокочувствительные датчики различного типа (накладные, встроженные и дистанционные), а также специальное оборудование.

Электрический метод состоит в измерении электрических параметров электропривода (напряжения, силы тока, мощности, сопротивления) и оценке их изменения в процессе эксплуатации машины. Его также используют при диагностировании работоспособности металлоконструкций машин.

Метод радиоактивных изотопов основан на введении в зону трения искусственных радиоактивных изотопов с периодом полураспада не менее 10 дней. Введение изотопов в деталь осуществляли различными способами, в том числе электролитическим нанесением радиоактивного металла, диффузионной обработкой радиоактивными элементами и др. До Чернобыля этот метод был довольно широко распространен. В настоящее время по известным причинам в Беларуси он практически не применяется.

Наиболее информативными и простыми методами оценки работоспособности машин по износу являются способы анализа состояния смазочных сред и других рабочих жидкостей, которые основаны на определении состава и концентрации примесей в различных рабочих жидкостях, используемых в агрегатах и узлах машины (в топливе, рабочих, смазочных и охлаждающих жидкостях). В их числе анализ наличия и содержания в смазочных средах продуктов изнашивания трущихся поверхностей, например, в механических или гидравлических передачах трансмиссии машины, по составу и концентрации которых можно судить о работоспособности диагностируемого объекта.

В большинстве способов анализу подвергают масла, которые служат смазочной средой узлов трения машин и содержат отслоившиеся в результате износа частицы металла трущихся поверхностей деталей. Из масла, в котором находятся продукты изнашивания, периодически отбирают пробы и определяют содержание железа, по которому судят о протекании процессов изнашивания и о работоспособности узлов трения. Содержание железа оценивают различными методами, сопоставляя анализируемое масло со стандартным маслом, не содержащим примесей: *по цвету масла (колориметрическим методом)*; *напряженности электрического поля, возникающего вокруг помещенного в масло электрода (полярографическим)*; *величине магнитной индукции при размещении масляной пробы в катушку индуктивности (магнитно-индуктивным)*; *интенсивности радиационного излучения при прохождении через масло (радиационным)*; *интенсивности светового потока, рассеянного жидкостью (нефелометрическим методом)*. В основном эти методы используют для анализа скорости изнашивания трущихся поверхностей сборочных единиц по составу и концентрации продуктов износа железа в смазочной среде. Их соотношение дает информацию о работоспособности анализируемой сборочной единицы и машины в целом. Более сложным, но и более информативным представляется *метод спектрального анализа* масла, который дает точную информацию о составе и концентрации различных элементов в продуктах изнашивания.

Большая часть описанных инструментальных методов имеет исследовательский характер и применяется для анализа работоспособности агрегатов и механизмов машины в лабораторных условиях при наличии соответствующего оборудования и квалифицированных специально обученных сотрудников.

6.4 Дефектация деталей

Оценку технического состояния деталей машин, поступивших в ремонт, называют *дефектацией*. Эта операция влияет на качество отремонтированной машины, ее ресурс, расход запасных частей и стоимость ремонта.

Цели дефектации достаточно обширны:

- 1) определение технического состояния деталей;
- 2) сортировка на три группы (годные для дальнейшего использования, подлежащие восстановлению и негодные);
- 3) сортировка деталей по маршрутам восстановления;
- 4) систематизация данных о результатах дефектации и сортировки, необходимых для совершенствования ремонтного производства.

Техническое состояние деталей оценивают с учетом требований нормативно-технической документации. Задачей такой оценки является выявление всех возможных дефектов деталей.

Дефектацию осуществляют для всех деталей и сборочных единиц, за исключением деталей, которые не допускают к использованию независимо от их технического состояния (например, шайбы пружинные и замковые, манжеты и сальники, различные прокладки и др.).

Дефектом детали считают ее несоответствие требованиям нормативно-технической документации, что может быть причиной отказа детали, узла или машины в целом.

Сортируемые детали имеют следующие т и п и ч н ы е дефекты:

1) износ, который проявляется в изменении размеров и формы поверхностей детали (появления биения, конусности, овальности, бочко- и седлообразности, некруглости и др.);

2) усталостные трещины;

3) поломки, разрушения сварных и заклепочных швов, обрывы;

4) потеря упругости, остаточные деформации от перегрузок и тепловых напряжений;

5) коррозионные разрушения.

Дефектацию проводят в соответствии с техническими условиями на проверку состояния и сортировку деталей. В технической документации на сортировку указывают недопустимые дефекты, т. е. браковочные признаки, а также размеры, которые подвергаются контролю, их допускаемые отклонения для годных деталей и ремонтные размеры для ремонтируемых деталей. Кроме того, указывают допускаемые отклонения формы и расположения поверхностей (по круглости, овальности, параллельности, перпендикулярности, соосности, биениям радиальным и торцевым).

При дефектации составляются к а р т ы, в которых отмечают:

1) общие сведения по каждой детали;

2) перечень их дефектов;

3) способы обнаружения дефектов и необходимые для этого технические средства;

4) допускаемые без ремонта размеры детали;

5) рекомендуемые способы устранения дефектов и восстановления деталей.

Как было отмечено, по результатам дефектации д е т а л и сортируют на три группы:

а) годные для дальнейшего использования;

б) подлежащие восстановлению;

в) негодные.

Годные к использованию детали направляют на сборку или на склад годных деталей после соответствующей маркировки (зеленым цветом). Их годность к дальнейшей эксплуатации определяют по остаточному ресурсу, который должен быть больше (или равен) межремонтному ресурсу. На практике остаточный ресурс представляет собой минимально возможный размер с учетом допускаемого износа. Например, для вала это разность между номинальным диаметром вала и толщиной слоя износа. Соответственно, деталь выбраковывают, если диаметр вала меньше остаточного ресурса.

Детали, подлежащие восстановлению, имеют дефекты (повреждения, износ), которые можно устранить технологическими способами с использованием необходимого оборудования ремонтной службы предприятия. Эти детали также маркируют соответствующим образом (желтым цветом) и направляют в ремонтное производство или на склад заготовок ремонта.

Негодные детали имеют браковочные признаки, т. е. недопустимые дефекты, которые делают их непригодными для восстановления. Их дальнейшее использование – в металлолом и переработку. Если деталь содержит выбраковочный дефект, дальнейший осмотр не проводится. В таблице 6.5 приведены дефекты основных деталей машин, по которым производится их выбраковка.

Результаты дефектации деталей обследованных машин статистически обрабатывают для определения числа деталей, отобранных в различные группы. Они служат основанием для обеспечения ремонтного производства запчастями и необходимым технологическим оборудованием.

Методы выявления дефектов делятся на две группы: *визуальные* и *инструментальные (измерительные)*.

Часть дефектов можно обнаружить простым осмотром (визуально), используя при необходимости, простейшие измерительные средства (масштабную линейку, штангенциркуль). К ним относятся видимые трещины, пробоины, разрушения швов, обширные коррозионные поражения, обрывы, вмятины, большие остаточные деформации, нарушение герметичности уплотнений и др.

Измерительный контроль применяют для получения количественной оценки отклонений параметров формы и относительного положения поверхностей детали, скрытых дефектов и физико-механических свойств материала деталей.

Таблица 6.5 – Признаки дефектов деталей, не подлежащих восстановлению

Детали	Признаки дефектов
Зубчатые колеса	Облом зубьев, видимый износ по толщине, трещины любых размеров и расположения
Детали со шлицами	Сдвиги, смятие и облом шлицов, скручивание вместе с деталью, видимый износ шлицов по толщине
Детали со шпоночными пазами, шпонки	Видимый износ, смятие и сдвиг боковых поверхностей
Детали с резьбой	Срыв более двух ниток, сдвиг ниток и их видимый износ, смятие граней (под ключи) или шли
Валы и оси: посадочные поверхности, шлицы, пазы, резьба	Трещины любых размеров, видимые изгибы, износ посадочных поверхностей под подшипники, указанные дефекты шлицов, резьбы и шпоночных пазов
Корпусы редукторов	Трещины любых размеров, выходящие на плоскости разъемов и посадочные поверхности отверстий, износ отверстий под подшипники
Рабочие органы, рамы	Поломка несущих деталей из-за износа, сквозные трещины, видимые деформации несущих конструкций

Контроль состояния деталей выполняют в порядке усложнения дефектов и трудности их обнаружения:

– сначала деталь подвергают внешнему осмотру, в результате которого визуально определяют крупные трещины, деформации, износ, изломы, коррозию, пробоины. Если обнаруживают неустранимые дефекты, деталь признается непригодной;

– затем деталь проверяют на специальных приспособлениях и приборах для выявления недопустимого нарушения взаимного расположения рабочих поверхностей и недопустимого изменения физико-механических свойств материала детали. Если обнаруживают неустранимые дефекты, деталь выбраковывают;

– далее деталь контролируют на наличие микротрещин и других скрытых дефектов. При выявлении дефектов ее выбраковывают;

– после этого выполняют обмер рабочих поверхностей детали для определения степени износа и геометрических форм детали.

Для выявления дефектов используют различные методы, специальные приборы и приспособления в зависимости от параметров и формы проявления дефектов, а также от конструктивных особенностей детали.

Визуальный наружный осмотр позволяет обнаружить достаточно крупные дефекты. При визуальном осмотре выбраковывают детали с недопустимыми дефектами, которые видны без технических средств (с полумками, трещинами, разрушениями швов, большими остаточными деформациями, износом, коррозионными поражениями и др.). Так, например, корпусные детали бракуют, если у них обнаружены сквозные трещины и изломы, снижающие прочность и влияющие на монтажные размеры. Валы и оси выбраковывают при наличии трещин, изломов и остаточных деформаций от напряжений кручения. Заметим, что остаточные деформации от изгиба допускаются в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Зубчатые колеса не подлежат восстановлению при наличии сломанных зубьев, а также трещин и питтинга на большом количестве зубьев.

Пружины и пружинные кольца, стопорные шайбы выбраковывают при наличии трещин и остаточных напряжений.

Болты, шпильки, гайки и пробки бракуют при изнашивании и срыве более двух ниток резьбы на рабочей части.

Штоки всех видов бракуют при наличии остаточных деформаций.

Визуально-оптический контроль осуществляют с помощью моно- и бинокулярных луп с 20–30-кратным увеличением и применяют для выявления более мелких дефектов (трещин, сколов, пробоин). Для обнаружения поверхностных дефектов в закрытых полостях и отверстиях используют линзовые эндоскопы, эндоскопы с оптоволоконными световодами и перископические дефектоскопы.

Износ поверхностей цилиндрических и плоских деталей (диаметр, толщину, конусность, овальность, круглость и др.) измеряют универсальными инструментами.

Контроль *расположения поверхностей* деталей (например, отклонения от соосности отверстий под подшипники в коробке передач или отклонения от перпендикулярности осей цилиндров главной оси коленчатого вала) осуществляют с помощью средств измерения линейных размеров и индикаторов или оптическими методами.

Чтобы оценить *ухудшение физико-механических характеристик* (твердости, жесткости) материала деталей, используют универсальные приборы для определения твердости и микротвердости материалов, а также нагрузочные приспособления для определения жесткости упругих элементов (пружин, рессор и др.).

Нарушения герметичности корпусных деталей выявляют с помощью гидравлических и пневматических испытаний.

Наибольшее распространение получил *компрессионный метод* контроля герметичности. Он заключается в создании перепада давления (газа или жидкости) между внутренней емкостью детали и окружающей средой и регистрации прохождения газа или жидкости через дефекты стенок детали. Например, радиаторы и баки, трубопроводы заполняют сжатым воздухом, а затем погружают в воду, выявляя места дефектов по наличию пузырьков воздуха. Как правило, давление при опрессовке в 1,5–2,0 раза превышает рабочее давление детали. Этим методом можно определить сквозные, сравнительно большие трещины.

Метод гидравлических испытаний также применяют для обнаружения трещин в корпусных полых деталях и трубопроводах. Например, блоки цилиндров испытывают на стендах, закачивая воду под давлением 0,3–0,4 МПа и выявляя подтеки воды, которые характеризуют наличие скрытых трещин.

Для выявления скрытых дефектов на поверхности и в объеме детали используют различные измерительные методы, в их числе капиллярный, люминесцентный, магнитный и ультразвуковой.

Капиллярный метод предназначен для обнаружения невидимых или слабо видимых невооруженным глазом поверхностных дефектов, определения их расположения, протяженности и ориентации по поверхности. Его используют для анализа микроскопических дефектов в изделиях из любых конструкционных материалов (черных и цветных металлов, стекла и керамики, полимеров и композитов). Метод основан на свойствах некоторых жидкостей, обладающих небольшим поверхностным натяжением (перетрантов), проникать в поверхностные дефекты. Имеется несколько видов капиллярного метода в зависимости от типа проникающей жидкости.

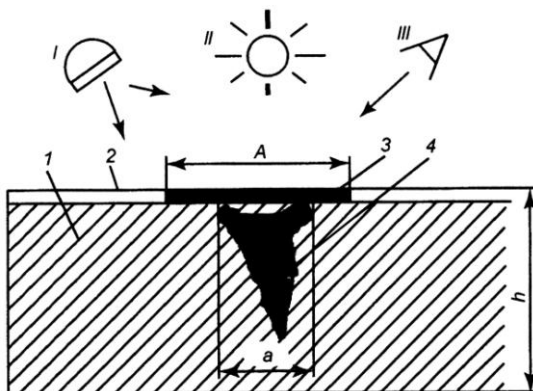
Наибольшее распространение имеет *метод фильтрующихся суспензий*. Индикаторная жидкость, нанесенная на проверяемую поверхность детали, проникает в трещину и остается в ней, образуя «индикаторный след». При нанесении на обработанную поверхность специального проявляющего вещества дефект обнаруживают визуально, а именно, по следу жидкости. На рисунке 6.5 приведена принципиальная схема определения дефекта в детали капиллярным методом. Невидимая невооруженным глазом трещина 4 шириной a проявляется за счет образования индикаторного следа 3 от нее до размера A и создания высокого оптического контраста между поверхностью детали 1 и проявляемым на ней рисунком.

Процесс капиллярной дефектоскопии включает следующие стадии:

- 1) нанесение индикаторной жидкости (пенетранта) на поверхность детали (крупногабаритной – кистью, малогабаритной – окунанием);
- 2) ополаскивание поверхности детали водой;
- 3) сушка поверхности;
- 4) обработка поверхности проявляющим веществом (тонкодисперсным порошком мела, каолина и др.);
- 5) обнаружение дефекта по следу индикаторной жидкости, выступающей вдоль трещины.

Рисунок 6.5 – Схема определения дефекта капиллярным методом:

- I – источник ультрафиолетового излучения;
- II – источник света при цветном контроле;
- III – объектив;
- 1 – деталь;
- 2 – проявляющее вещество;
- 3 – след пенетранта;
- 4 – трещина со следами пенетранта



Имеется несколько разновидностей капиллярного метода, позволяющих выявить поверхностные трещины шириной не менее 0,01–0,02 мм и глубиной более 0,01–0,04 мм. К ним относятся *керосиновая, масляная и цветная пробы*, где в качестве индикаторной жидкости используют керосин, минеральное масло или краситель, растворенный в керосине (или другом растворителе). В качестве проявителя используют тонкодисперсный мел или каолин. С помощью этого метода выявляют трещины шириной более 0,03–0,05 мм.

Например, *метод керосиновой пробы* состоит в следующем:

– поверхность проверяемой детали смачивают керосином и выдерживают 1–2 мин;

– протирают поверхность детали до сухого состояния и покрывают порошкообразным мелом;

– визуально анализируют по следам мела наличие и границы трещин.

Для контроля применяют дефектоскопы ДМК-4У, ДМК-5, КД-31Л, КД-32Л, КД-40ЛЦ и др., а также установки типа КД-20Л, КД-21Л, ЦКД и др.

Люминесцентный метод дефектоскопии является разновидностью капиллярного. Он основан на способности некоторых веществ (*люминофоров*) светиться в ультрафиолетовых лучах. В качестве источника ультрафиолетовых лучей используют в основном ртутно-кварцевые лампы. Как правило, метод применяют для контроля деталей из цветных металлов и неметаллических материалов.

В качестве люминофоров используют как твердые, так и жидкие вещества, но предпочтение отдают жидким из-за более высокой проникающей способности. Из твердых люминофоров в основном используют тонкодисперсные порошки окиси магния (MgO), углекислого магния ($MgCO_3$) и их смеси, из жидких – керосин или нефтепродукты с высокой пенетрацией (проникающей способностью). На рисунке 6.6 показана схема люминесцентного метода.

Соответственно, имеются два варианта люминесцентной дефектоскопии с применением *жидких* и *твердых* люминофоров.

Первый вариант с применением *жидкого люминофора* включает следующие операции:

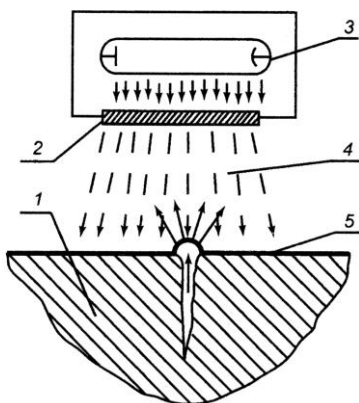


Рисунок 6.6 – Схема определения дефекта люминесцентным методом:

1 – деталь; 2 – световой фильтр; 3 – ртутно-кварцевая лампа; 4 – излучение; 5 – люминофор

1) нанесение на обрабатываемую поверхность жидкого люминофора;

2) сушка поверхности;

3) нанесение тонкодисперсного порошка абсорбента, т. е. вещества, впитывающего индикаторную жидкость;

4) обработка поверхности ультрафиолетовыми лучами и выявление скрытых дефектов.

Второй вариант с применением твердого люминофора состоит из следующих операций:

1) втирание тонкодисперсных частиц твердого люминофора в поверхность детали;

- 2) очистка поверхности от излишков порошка;
- 3) обработка поверхности ультрафиолетовыми лучами и обнаружение трещин.

В настоящее время получили распространение специальные комплекты, содержащие необходимые для дефектоскопии компоненты. В частности, для цветного метода применяют комплекты типа ДК (ДК-1, ДК-3, ДК-4, ДК-6, ДК-7); для люминесцентного – комплекты типа ЛЮМ (ЛЮМ-А, ЛЮМ-Б, ЛЮМ-В), а также ДК-2 и ДК-5. В состав комплекта обычно входят следующие компоненты:

- индикаторный пенетрант, т.е. капиллярный материал, способный проникать в несплошности детали;
- проявитель (материал, предназначенный для извлечения пенетранта и формирования четкого индикаторного следа);
- очиститель (материал, обеспечивающий удаление пенетранта с поверхности детали);
- гаситель (материал для гашения люминесценции или цвета остатков пенетранта на анализируемой поверхности детали).

Помимо ртутно-кварцевых ламп (низкого и высокого накаливания и высокого давления типа ПРК-2, ПРК-7, ДРШ-500-3 и др.), для освещения анализируемых поверхностей и проявления люминофоров используют люминесцентные ртутные лампы (например, ЛУФЧ-1), а также обычные источники освещения.

Люминесцентный метод дает возможность выявить только поверхностные дефекты, в частности, трещины шириной более 0,01 мм и глубиной более 0,03–0,04 мм.

Метод магнитной порошковой дефектоскопии состоит в намагничивании проверяемой детали и обнаружении искажений магнитного поля вблизи поверхностных дефектов (трещин, раковин, пустот) при помощи тонкодисперсного порошка ферромагнетика. Метод применяют только для ферромагнитных материалов (сталей и чугунов). Магнитные силовые линии проходят через деталь и, встречая на своем пути дефект, огибают его как препятствие с малой магнитной проводимостью и рассеиваются над ним. В качестве индикатора искажений магнитного поля используют тонкодисперсный магнитный порошок (с размером частиц 1–10 мкм) в сухом состоянии или в виде суспензии. Магнитный порошок притягивается к месту рассеяния магнитного поля и осаждается, обозначая место расположения трещины или другого дефекта. Магнитные суспензии готовят на водной основе, а также на основе смеси минерального масла и керосина.

Намагничивание деталей производят различными методами: *циркулярным (циркуляционным), полюсным и комбинированным* (рисунок 6.7). Их применение зависит от конфигурации детали и расположения дефекта. Наибольшую чувствительность намагничивание имеет в том случае, ко-

гда дефект расположен перпендикулярно направлению магнитных силовых линий.

Для намагничивания применяют постоянные магниты, а также постоянный (от аккумуляторных батарей) и переменный (от сварочных трансформаторов) ток. Постоянный ток используют для обнаружения внутренних дефектов, а переменный – поверхностных несплошностей. Обычно намагничивание производят 2–3 раза в течение 1,5–2,0 с. Намагничивание *циркулярным* (поперечным) методом осуществляют пропуском через деталь переменного или постоянного тока большой силы (1000–4000 А). Если деталь полая (гильза, цилиндр и др.) (см. рисунок 6.7, а), ток пропускают через электропроводящий стержень, устанавливаемый в полости детали (тороидное намагничивание). Если деталь сплошная несложной конфигурации (см. рисунок 6.7, б), ток пропускают через саму деталь. В этом случае деталь не имеет явно выраженных полюсов. Этот метод обеспечивает обнаружение дефектов, которые располагаются вдоль или под острым углом к продольной оси детали.

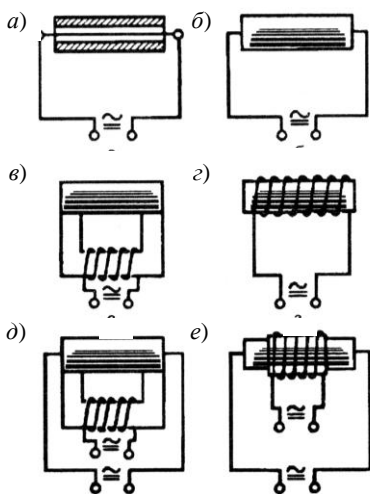


Рисунок 6.7 – Схемы намагничивания детали различными методами:

а, б – циркулярным; в, г – полюсным; д, е – комбинированным

ными пластинами и пропускают через нее переменный ток.

На рисунке 6.8 приведена типичная схема намагничивания соленоидом.

Комбинированный метод включает полюсное и циркулярное намагничивание. Его применяют для дефектоскопии сложных по конфигурации деталей.

Намагничивание *полюсным* (продольным) методом производят постоянным магнитом или электромагнитом со стальным сердечником (см. рисунок 6.7, в), также помещая деталь в соленоид (см. рисунок 6.7, г). Схему с сердечником применяют для выявления поперечных трещин в деталях типа шестерен, пластин, колец, дисков, а схему с соленоидом – в деталях типа валов и осей.

Намагничивание *комбинированным* методом, сочетающим циркулярное и полюсное намагничивание (см. рисунок 6.7, д, е), позволяет выявить дефекты в сложных по конфигурации деталях (шатунах, кронштейнах и др.).

На рисунке 6.8 показана принципиальная схема устройства для циркулярного намагничивания детали 2, которую устанавливают между двумя контак-

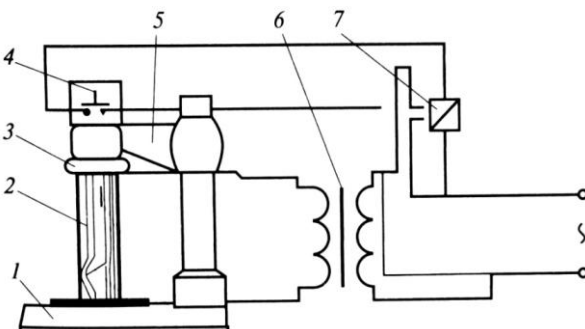
На рисунке 6.10 представлена принципиальная схема комбинированного метода намагничивания детали.

Процесс магнитной порошковой дефектоскопии включает следующие стадии:

- 1) подготовка поверхности детали (чем меньше шероховатость поверхности, тем выше чувствительность метода);
- 2) намагничивание детали циркуляционным, полюсным или комбинированным методом;
- 3) нанесение на проверяемую поверхность детали магнитного порошка или его суспензии в жидкости;
- 4) анализ поверхности и выявление дефектов;
- 5) размагничивание детали.

Рисунок 6.8 – Схема циркулярного намагничивания детали:

- 1 – стол с контактной пластиной;
- 2 – деталь;
- 3 – контактная пластина;
- 4 – пусковая кнопка;
- 5 – кронштейн;
- 6 – понижающий трансформатор;
- 7 – магнитный пускатель



Для магнитной дефектоскопии используют стационарные дефектоскопы типа УМДЭ-2500, ХМД-10П, МД-5 и другие, предназначенные для дефектоскопии деталей различных габаритов и конфигурации, а также переносные и передвижные дефектоскопы типа ПМД-3М, ПЛМ-70, МЛ-50П и др.

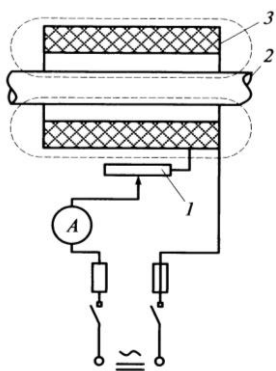


Рисунок 6.9 – Схема намагничивания детали соленоидом:

- 1 – реостат;
- 2 – деталь;
- 3 – соленоид

Метод магнитной дефектоскопии обладает большей чувствительностью, чем капиллярный. Он позволяет выявлять трещины шириной более 0,001 мм, а также полые дефекты (раковины, пустоты) размером более 1 мм, расположенные на глубине не более 15 мм.

Ультразвуковой (акустический) метод используют для анализа дефектов в объеме детали. Контроль дефектов (трещин, раковин, шлаковых включений) осуществляют путем распространения в металле ультразвуковых

колебаний (частотой 0,5–2,5 10,0 МГц), их отражения от дефектов и регистрации.

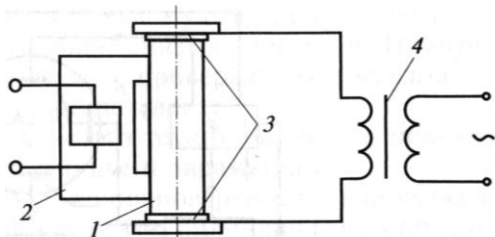


Рисунок 6.10 – Схема комбинированного метода намагничивания детали:

1 – деталь; 2 – электромагнит;
3 – контактные пластины; 4 – трансформатор

Сущность метода состоит в том, что высокочастотные (ультразвуковые) волны в однородных материалах распространяются направленно и без значительного затухания. Но на границе «твердая среда – воздух» они почти полностью отражаются, что и используют для выявления дефектов (раковин, трещин, пустот и др.) на глубине от нескольких миллиметров до нескольких метров.

Имеется несколько разновидностей ультразвуковой дефектоскопии, из которых наиболее широко используют два метода:

- 1) просвечивания (теневой метод);
- 2) импульсный (эхо-метод или ультразвуковая локация).

Метод просвечивания основан на улавливании звуковой тени за дефектом (рисунок 6.11). Проверяемую деталь 4 размещают между излучателем ультразвуковых колебаний 5 и их приемником 3. От генератора 6 электрические импульсы поступают к пьезоэлектрическому излучателю 5, который преобразует их в ультразвуковые колебания. В отсутствие дефекта (см. рисунок 6.11, а) импульсы проходят через деталь 4 и улавливаются пьезоприемником 3. При наличии дефекта (см. рисунок 6.11, б) колебания, посланные излучателем, отражаются от дефекта и не попадают на приемник, поскольку он будет расположен в зоне звуковой тени. Перемещая излучатель и приемник, можно определить параметры дефекта. Этот метод используют для анализа деталей небольшой толщины, при этом необходим двухсторонний доступ к деталям, что несколько ограничивает возможности применения метода.

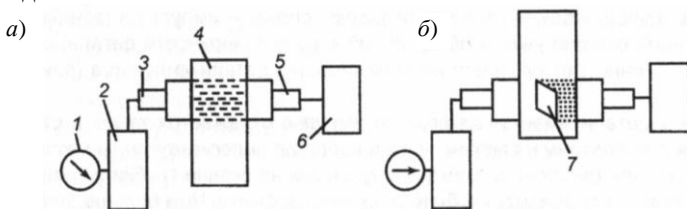


Рисунок 6.11 – Схемы ультразвукового контроля детали методом просвечивания (а – без дефекта; б – с дефектом):

1 – индикатор; 2 – усилитель; 3 – пьезоприемник; 4 – деталь; 5 – излучатель;
6 – генератор; 7 – дефект

Импульсный эхометод является более универсальным, поскольку приемник улавливает отраженные от дефекта ультразвуковые колебания, которые несут информацию о его границах. Реализация этого метода не требует излучателя и приемника. Излучатель испускает импульсные сигналы и затем автоматически переключается в режим приема сигналов. Такой комбинированный излучатель (он же приемник сигналов), как правило, располагают на зонде (в виде плоского или призматического щупа), что значительно расширяет возможности анализа различных по конфигурации и габаритам деталей. Для их изготовления используют пластины из титаната бария (BaTiO_3), который имеет очень большой пьезоэффект (в 500 раз выше, чем у кварца).

На рисунке 6.12 представлена принципиальная схема импульсного ультразвукового дефектоскопа. К детали 1 подводят щуп, в который вмонтирован излучатель-приемник 2. Если деталь не имеет дефектов, то на экране электронно-лучевой трубки 5 возникает два сигнала: импульс *a* (зондирующий сигнал – от передней поверхности детали) и импульс *в* (донный сигнал – от ее задней поверхности). Если же в детали имеется дефект, возникает дополнительный сигнал, который отражается от поверхности дефекта, – в виде импульса *б*, амплитуда которого дает информацию о размере дефекта.

Индикатором может служить не только электронно-лучевая трубка (как в упомянутой схеме). В современных дефектоскопах используют жидкокристаллические и плазменные дисплеи, которые портативны и более экономичны. Кроме того, в современных моделях широко применяют элементы вычислительной техники для настройки в диалоговом режиме работы, а также для автоматического измерения характеристик дефектов. Имеются дефектоскопы, построенные на базе портативного компьютера, который обеспечивает возможность корреляционной обработки эхо-сигналов и изучение их спектра, что значительно расширяет возможности метода.

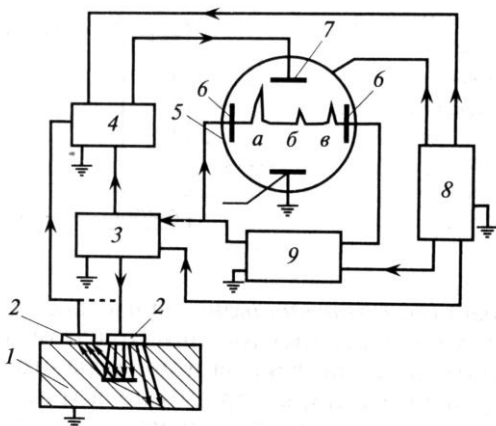


Рисунок 6.12 – Схема импульсного ультразвукового дефектоскопа:

- 1 – деталь; 2 – излучатель-приемник; 3 – генератор импульсов; 4 – усилитель сигналов; 5 – электронно-лучевая трубка; 6, 7 – отклоняющие пластины; 8 – блок питания; 9 – разветвляющее устройство

В целом достоинством ультразвуковых методов является несложная (по сравнению с другими упомянутыми способами) подготовка поверхности и сохранение исходного состояния детали.

Для ультразвуковой дефектоскопии используют разнообразные дефектоскопы, в том числе отечественные УДМ-3, УДЦ-100, УДЦ-105М, УЗД-7Н, УД-10П, УД-ЦПУ и др.

Ультразвуковые дефектоскопы обладают наиболее высокой чувствительностью при выявлении несплошностей и неоднородностей в деталях, в том числе как поверхностных (трещин), так и объемных внутренних (раковин, трещин, пустот, непроваров) дефектов. Для контроля деталей из металлов применяют в основном эхо-метод как наиболее чувствительный и помехоустойчивый. Его используют для самых разных деталей и конструкций, в том числе для контроля отливок, поковок и штамповок, проката и проволоки, сварных соединений, многослойных конструкций и др.

При дефектации проводят инструментальный контроль формы, размеров и положения рабочих поверхностей детали. Геометрические характеристики деталей определяют для установления правильности их формы, отклонения фактических размеров от номинальных, оценки величины износа в подвижных сопряжениях и зазоров в неподвижных соединениях.

Для этих целей используют проверочные и измерительные инструменты, устройства и приборы. В их числе *штангенциркули* для измерения наружных и внутренних поверхностей деталей, *штангенглубиномеры* – для измерения глубины отверстий и высоты выемок, *штангензубомеры* – для измерения толщины зубьев цилиндрических зубчатых колес, *микрометры* – для измерения наружных размеров, *резьбовые микрометры* – для измерения резьб, *индикаторные нутромеры* – для измерения внутренних размеров, *индикаторы часового типа* – для измерения линейных размеров, отклонения формы и биения вращающихся деталей.

Индикаторы часового типа широко применяют в специально разработанных моделях оснастки для проверки взаимного расположения поверхностей деталей. Например, для проверки соосности отверстий под подшипники в корпусных деталях (рисунок 6.13) используют приспособление, оснащенное индикаторными оправками *1* и втулкой *3* с индикатором часового типа.

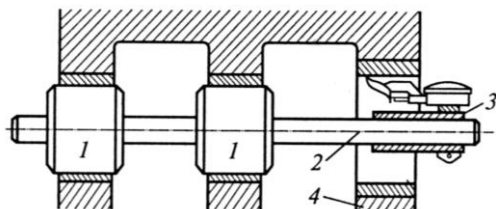


Рисунок 6.13 – Схема проверки соосности отверстий:
1 – центрирующая оправка;
2 – центрирующий вал;
3 – втулка с индикатором;
4 – деталь

Для проверки параллельности осей отверстий в картерных деталях (рисунок 6.14) также применяют индикаторы *1* часового типа в составе приспособления, оснащенного разжимными оправками.

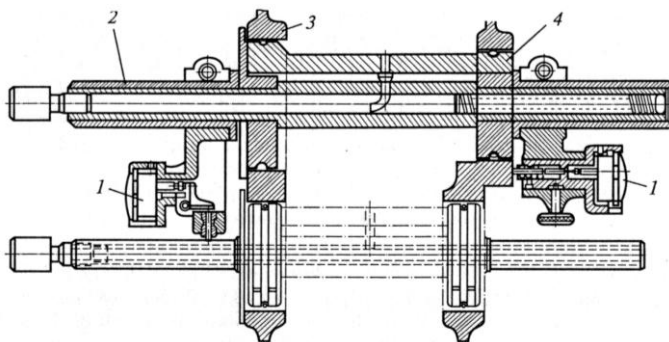


Рисунок 6.14 – Схема проверки параллельности осей отверстий в корпусной детали:
1 – индикатор; 2 – штанга в сборе; 3 – картер; 4 – установочная шайба

Такие детали, как валы проверяют на соосность их шеек, измеряя степень биения. На рисунке 6.15 представлена схема замеров, которые выполняют с помощью индикаторов при проворачивании вала в призмах или центрах. Если конструктивное исполнение детали не позволяет расположить призмы на концах детали, в этом случае биение замеряют в центре и на концах вала (как показано на рисунке). Суммарное значение биения определяют из выражения

$$\Delta\delta_{\Sigma} = \Delta\delta_2 + \frac{\Delta\delta_1 + \Delta\delta_3}{2},$$

где $\Delta\delta_i$ – значение биения на концах и в центре детали.

По суммарному биению $\Delta\delta_{\Sigma}$ определяют прогиб вала.

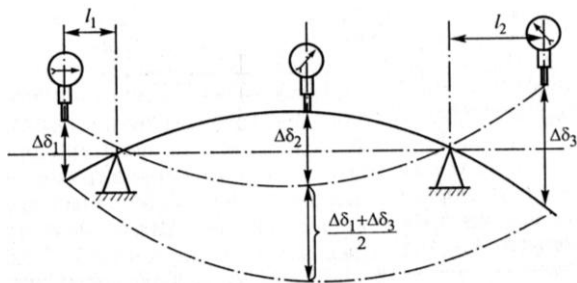


Рисунок 6.15 – Схема замеров при определении прогиба вала

Изменение размеров и геометрических форм деталей вследствие изнашивания при эксплуатации определяют в результате измерений рабочих поверхностей деталей. В зависимости от формы и габаритов детали измерения производят универсальными инструментами (микрометром, индикаторным нутромером, штангенциркулем и др.), браковочными калибрами и специальными измерительными приборами.

Для наружных рабочих поверхностей деталей цилиндрической формы измерения (микрометром или штангенциркулем) производят в двух-трех сечениях по длине детали (рисунок 6.16) и в каждом сечении в двух-трех направлениях. По результатам измерений определяют сечение с наибольшим износом, а также нарушения формы детали (овальность, конусность, бочкообразность и др.).

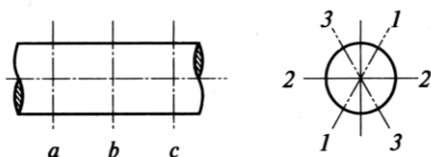


Рисунок 6.16 – Схема обмера детали цилиндрической формы:
a, в, с – сечения для измерений;
1, 2, 3 – направления для измерений

Для деталей сложной конфигурации используют специальные методы измерений и специализированное измерительное оборудование.

Как отмечалось, после определения технического состояния деталей на участке контроля их сортируют. Детали, которые будут восстанавливать, сортируют по дефектам и маршрутам. Сортировка по дефектам базируется на однородности дефектов, сортировка по маршрутам – на однотипности (однородности) технологии восстановления деталей, имеющих комплекс дефектов. Например, при восстановлении деталей типа валов оказываются дефектными, %:

- гладкие поверхности – 50;
- шлицевые и гладкие поверхности со шпоночными канавками – 23;
- резьбовые и прочие поверхности – 22;
- зубчатые поверхности – 5.

Это позволяет в условиях серийного ремонтного производства разработать маршрутную технологию восстановления деталей машин. При этом состав операций определяют по сочетанию дефектов деталей.

6.5 Классификация основных методов восстановления деталей

Восстановление деталей является одним из важных направлений ресурсосбережения, имеющих значительную экономическую эффективность. Так себестоимость большинства восстановленных деталей не превышает 75 % себестоимости новых деталей, а расход материалов в 15–20 раз ниже, чем при изготовлении новых деталей.

Известно, что около 75 % деталей, выбраковываемых при первом капитальном ремонте, являются ремонтнопригодными. Поэтому вторичное использование изношенных деталей является эффективной альтернативой расширению производства новых запасных частей. У большинства ведущих компаний по производству машин имеются ремонтные предприятия, которые занимаются восстановлением деталей и агрегатов машин. Так, в общем объеме их продукции 10–40 % приходится на выпуск восстановленных де-

талей и агрегатов. В числе восстанавливаемых деталей такие дорогостоящие и металлоемкие изделия, как коленчатые и распределительные валы, гильзы и блоки цилиндров, тормозные барабаны, а также многие другие детали силового оборудования, трансмиссий, тормозных и ходовых систем.

Изготовление новых деталей, а также восстановление изношенных и поврежденных составляет значительную часть расходов ресурсов при ремонте машин. Так, даже на специализированных заводах они доходят до 50 % стоимости и до 40 % трудоемкости ремонта машин. Поэтому сокращение расходов является важной задачей. Одним из путей ее решения является восстановление дефектных деталей. К типичным дефектам деталей и сборочных единиц относятся:

- 1) нарушение посадки между сопряженными поверхностями;
- 2) нарушение размеров, геометрической формы и относительного положения в пространстве поверхностей деталей;
- 3) ухудшение свойств материала;
- 4) ухудшение внешнего вида.

Задача восстановления дефектных сопряжений и деталей состоит в возврате утраченных свойств: посадки, формы, относительного положения в пространстве поверхностей, свойств материала и внешнего вида детали. *Восстановить посадку* между сопряженными поверхностями деталей можно следующими методами:

- 1) обработкой изношенной поверхности одной детали и заменой сопряженной детали (способ ремонтных размеров);
- 2) применением дополнительной ремонтной детали (компенсатора износа);
- 3) восстановлением первоначальных размеров сопряженных поверхностей деталей.

Восстановить же саму деталь или ее отдельные поверхности можно:

- 1) снятием (удалением) материала с поверхности детали путем механической обработки (обточки, шлифования и фрезерования);
- 2) восстановлением целостности тела детали с помощью сварки, пайки и склеивания;
- 3) восстановлением относительного положения поверхностей детали в пространстве за счет статического нагружения, чеканки, местного нагрева;
- 4) наращиванием на дефектную поверхность детали другого материала наплавкой, напылением, электролитическим и химическим осаждением и др.;
- 5) перемещением посредством пластической деформации материала детали с одного участка к другому (изношенному) путем осадки, раздачи, обжатия, вытяжки и накатки.

В настоящее время в ремонтном производстве используют более 50 различных методов восстановления деталей. Представление о технологических возможностях ряда способов упрочнения деталей машин дает таблица 6.6 [11]. Эффективность их применения, а также выбор наиболее рационального технологического процесса восстановления зависят от многих факторов, в том числе от материалов, из которых изготовлены детали (стали, чугуны,

цветные металлы и сплавы, полимерные и композиционные материалы), их конструктивно-технологических особенностей, а также от условий эксплуатации деталей и узлов машин.

Таблица 6.6 – Методы упрочнения деталей машин

Способ	Технологические возможности			Назначение и эффективность процессов и способов
	HRC, HV	σ_0 , МПа	δ_y , мм	
<i>Термическая обработка</i>				
Объемная закалка	До HRC 40–55	Не изменяется	Не ограничивается	Повышение прочности углеродистых сталей в 1,5–2 раза, легированных – в 2–3 раза. Упрочнение отливок, поковок, штамповок, механически обработанных деталей, проката, сварных элементов
Поверхностная закалка с нагревом ТВЧ и газовым пламенем	HRC 40–70	300–800	0,2–10	Повышение предела выносливости на 40–100 % и износостойкости в 2 раза и более. Упрочнение поверхностей зубьев зубчатых колес, звездочек и муфт, шлицев, тормозных шкивов, осей, деталей шарниров тяговых цепей и других деталей из средне-, высокоуглеродистых и цементруемых сталей
<i>Химико-термическая обработка</i>				
Цементация	HRC 60–65	400–1000	0,5–2	По сравнению с закалкой ТВЧ повышение пределов выносливости при изгибе до 3 раз, повышение износостойкости в 1,5–2 раза
Азотирование	До HV 9000–11000	400–1000	0,05–0,6	То же и повышение коррозионно-усталостной прочности
Нитроцементация (газовое цианирование)	HRC 60–75	400–1000	0,05–2,5	То же, что и цементация, но достигаемый эффект более значителен: предел выносливости шестерен повышается в 2–3 раза, износостойкость в – 1,5–1,9 раза выше, чем при цементации
Алитирование	–	–	0,5	Повышение долговечности деталей из сталей обычного качества, работающих при повышенной температуре, до уровня долговечности деталей из жаростойких сталей

Продолжение таблицы 6.6

Способ	Технологические возможности			Назначение и эффективность процессов и способов
	HRC, HV	σ_0 , МПа	δ_v , мм	
Хромирование (высокотемпературное термодиффузионное)	HV 16000–20000	–	0,02–0,3	Повышение ударной вязкости и коррозионной стойкости. Износостойкость в 3–5 раз выше, чем при цементации; в – 1,5–2,8 раза выше, чем при нитроцементации
Силицирование	–	–	0,02–0,3	Повышение коррозионной стойкости и износостойкости при хорошей пластичности
Сульфидирование	Не изменяется	–	0,05–1,0	Повышение сопротивления схватыванию при трении без смазочного материала и со смазочным материалом (шестерни, втулки, гайки, плунжеры, клапаны и др.)
<i>Пластическое деформирование (наклеп поверхности)</i>				
Дробеструйная обработка	Увеличивается на 20–40 %	400–800	0,4–1,5	Упрочнение деталей сложной формы. Повышение циклической долговечности: рессор – в 2–7 раз; пружин – в 3–10 раз; осей – в 3–5 раз; зубчатых колес (после закалки ТВЧ) – в 8–12 раз
Центробежно-шариковый наклеп	Увеличивается на 15–60 %	400–800	0,3–1,5	Упрочнение наружных и внутренних цилиндрических поверхностей (коленчатые и тормозные валы, гильзы цилиндров, поршневые кольца, вкладыши подшипников и др.)
Обкатка роликами	Увеличивается на 20–50 %	До 1000	1–3,5	Упрочнение цилиндрических и винтовых поверхностей. Повышение циклической долговечности: штоков – в 3–4 раза, болтов, шпилек (обкатка резьбы) – в 2 раза
Чеканка	Увеличивается на 20–50 %	До 1000	0,5–3,5	Упрочнение деталей сложной формы и крупногабаритных. Повышение циклической долговечности крупно-модульных зубчатых колес (впадины), крупных валов (галтели), сварных металлоконструкций (швы и околошовные зоны)

Окончание таблицы 6.6

Способ	Технологические возможности			Назначение и эффективность процессов и способов
	HRC, HV	σ_0 , МПа	δ_v , мм	
<i>Термомеханическая обработка</i>				
Высокотемпературная ТМО (ВТМО)	–	–	Все сечения	Упрочнение проката, поковок, штамповок, изделий, полученных волочением и выдавливанием (экструзией)
Низкотемпературная ТМО (НТМО)	–	–	Все сечения	Повышение предела прочности легированных сталей в 5–6 раз (до 3100 МПа) при увеличении пластических свойств стали (относительное удлинение – до 9–12 % относительное сужение – до 45 %)
<p><i>Обозначения:</i> HRC, HV – твердость поверхности (по Роквеллу и Виккерсу); σ_0 – остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое; δ_v – толщина упрочненного слоя.</p>				

Контрольные вопросы к разделу 6

- 1 Назовите основные организационные мероприятия и технологические методы восстановления деталей на этапе эксплуатации машин.
- 2 Какие работы входят в состав периодического технического обслуживания машин?
- 3 Назовите основные классификационные признаки ремонта машин.
- 4 Выведите формулу экономически оправданного срока службы машины.
- 5 Дайте определение диагностирования и назовите основные классификационные признаки методов диагностирования.
- 6 Чем различаются прямые и косвенные параметры диагностирования?
- 7 Назовите основные инструментальные методы диагностирования и их особенности.
- 8 Что такое дефектация деталей и ее задачи?
- 9 Назовите последовательность контроля состояния деталей при дефектации.
- 10 Какими техническими возможностями обладают капиллярный, люминесцентный, магнитный и ультразвуковой методы?
- 11 Назовите типичные дефекты деталей и сборочных единиц.
- 12 Классифицируйте основные способы восстановления деталей машин.

Восстановление изношенных деталей – сложный процесс. В качестве заготовки используют изношенную, но уже сформированную деталь. Поэтому отсутствуют затраты на литье, ковку, штамповку и другие операции. Но зато появляются дополнительные операции: мойка, разборка, дефектация, комплектация, затраты на которые следует учитывать.

Износ различных групп дорожных, строительных и других машин находится в широких пределах – от 0,01 до 10 мм, но большая часть деталей (примерно 85 %) имеют износ до 0,6 мм. В зависимости от формы деталей их износ (%) распределяется следующим образом:

- цилиндрических – 52;
- нарушение геометрической формы – 13;
- резьбы – 10;
- трещины и изломы – 9;
- пазы, канавки – 5;
- шлицы – 3;
- конические, сферические поверхности – 3;
- зубья шестерен – 2;
- другие поверхности (плоские, профильные, фасонные) – 2.

Номенклатура восстанавливаемых деталей насчитывает сотни наименований. Для рациональной организации технологических процессов восстановления деталей и оценки их качества существует несколько классификаций деталей. Из них самой распространенной является классификация *по конструктивно-технологическим признакам*. К ним относятся материал, масса и размер детали, вид и величина износа, точность изготовления, общность дефектов и их сочетание, а также способы восстановления. Одна из таких классификаций включает до 15 групп деталей, в числе которых:

- 1) корпусные детали двигателей;
- 2) корпусные детали пусковых двигателей, компрессоров и др.;
- 3) корпусные детали трансмиссий;
- 4) валы коленчатые и распределительные;
- 5) валы, оси трансмиссий, валы карданные;

- 6) гильзы (цилиндры), шатуны, пальцы поршневые, валы и оси двигателей;
- 7) шкивы, маховики, диски сцеплений;
- 8) стаканы, ступицы колес, шкивов, вариаторов;
- 9) детали кареток подвески;
- 10) звенья гусениц, колеса, ролики, шкивы, барабаны шасси;
- 11) рамы, брусья, оси, цапфы ходовой части;
- 12) рабочие органы.

Как уже было отмечено, наибольшему износу подвержены детали и элементы рабочего оборудования, которые контактируют с объектами разработки (грунтами, дорожно-строительными материалами и др.)

Рациональный выбор эффективного способа восстановления деталей зависит от многих факторов. К основным относятся производительность, экономичность и доступность.

Источником тепловой энергии для *наплавки* и *напыления* являются газовое пламя и электрический ток, которые лежат в основе газотермического и электротермических методов. К числу электротермических методов относятся ручная наплавка покрытыми электродами, механизированная наплавка под флюсом и в среде защитных газов, электрошлаковая, вибродуговая и плазменная наплавки. В общем объеме сварочно-наплавочных работ электротермические методы составляют 80 %, газотермические (газопламенные) – 20 %.

Восстановление деталей наплавкой и сваркой является широко распространенным способом ремонта. Этим способом ремонтируется более 50 % всех деталей. Наплавкой можно нарастить слой практически любой толщины с заранее заданными свойствами, например, с высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью и др. Для этого используют наплавочные материалы, информация о которых представлена в разделе 4.

С помощью сварки производят заварку трещин и пробоин; приварку обломанных частей деталей и элементов усиления конструкций; прикрепление деталей, вводимых в сопряжения для компенсации износа; соединение элементов сварных заготовок для изготовления новых деталей.

Для наплавки используют только сварку плавлением, которая должна обеспечивать:

- неглубокое проплавление основного металла;
- высокую технологичность процесса, малую чувствительность к состоянию поверхности и форме детали;
- отсутствие склонности к возникновению дефектов (непроплавлений в местах стыков соседних швов, шлаковых образований, пор и трещин);
- высокую скорость процесса.

Для уменьшения глубины проплавления основного металла и повышения производительности применяют следующие приемы:

- 1) межэлектродную наплавку;
- 2) подогрев наплавочной электродной проволоки (за счет ее электрического сопротивления);
- 3) использование присадочных материалов;
- 4) поперечные колебания электрода.

Достоинствами наплавки являются:

- 1) недефицитность и дешевизна материалов;
- 2) простота, компактность и транспортабельность оборудования;
- 3) высокая прочность сцепления основы с наплавляемым слоем.

К недостаткам наплавки относятся:

- 1) большая глубина термовоздействия на основной металл;
- 2) снижение эффективности проведенной термической обработки детали;
- 3) большие деформации (коробление) детали;
- 4) снижение усталостной прочности основного металла из-за больших внутренних напряжений.

Затраты на восстановительную наплавку составляют 5–30 % стоимости новых деталей, при этом масса наплавленных слоев не превышает 6 % массы ремонтируемых деталей.

В качестве материалов для повышения износостойкости восстанавливаемых деталей используют покрытые электроды, проволоку сплошного сечения, порошковые проволоку и ленты, ленточные электроды, порошковые материалы.

Покрытые электроды для наплавки представляют собой стержни с нанесенным на них покрытием. Электродные стержни изготавливают из проволоки диаметром 2–8 мм из низкоуглеродистой стали. Покрытие содержит компоненты, продукты сгорания и разложения которых защищают зону расплава. В их числе раскислители, шлакообразующий материал, легирующие элементы и др. В СНГ имеется несколько стандартов на электроды, которые включают более 50 типов электродов с покрытием.

Проволоку сплошного сечения (диаметром 0,8–2,5 мм) используют для механизированной наплавки под флюсом и в среде защитного газа. В состав низко- и среднеуглеродистой стали вводят раскислители (Mn, Si, Al) и легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, V, W и др.) в зависимости от требуемых свойств наплавочного слоя. В СНГ действуют стандарты на проволоку сплошного сечения из стали (углеродистой, легированной и высоколегированной) и бронзы (алюминиево-железистой, алюминиево-марганцевистой, кремниево-марганцевистой).

Порошковая проволока (диаметром 2,6–8,0 мм) имеет мягкую тонколистовую стальную оболочку и сердцевину, содержание которой зависит от способа наплавки. Проволоку используют для механизированной наплавки под флюсом и в среде защитного газа, а также в открытой дуге. Соответственно, выпускают проволоку для наплавки под флюсом, в среде защитных

газов и в воздушной среде, а также универсальную. Для наплавки под флюсом состав сердцевины содержит порошковый сплав с легирующими компонентами, обеспечивающими заданный набор свойств наплавленного слоя; для наплавки в среде защитных газов или открытой дугой, помимо легирующих компонентов, в составе имеются раскислители, шлакообразующие элементы и др. В СНГ действует несколько стандартов на легированную и высоколегированную порошковую проволоку.

Ленточные электроды представляют собой холоднокатаные, порошковые и спеченные ленты, сформированные из различных материалов. Холоднокатаные ленты получают из пластичных низкоуглеродистых сталей. В СНГ разработаны стандарты на холоднокатаные ленты толщиной 0,4–1,0 мм и шириной от 20 до 100 мм, которые используют для повышения коррозионной стойкости восстанавливаемых деталей наплавкой под флюсом. Для износостойкой наплавки требуются ленточные электроды из сплавов с высокой твердостью в виде порошковых или спеченных лент. Порошковые ленты имеют оболочку из низкоуглеродистой стали и сердцевину из легирующих и шлакообразующих компонентов. Их используют для различных видов наплавки (под слоем флюса, в среде защитных газов и открытой дугой). Спеченные ленты изготавливают прокаткой и последующим спеканием порошковых материалов, содержащих необходимые компоненты, обеспечивающие защиту дуги и заданный уровень свойств наплавленному слою.

Помимо восстановления, наплавку с успехом используют при производстве запчастей. Расход металла на их производство в ряде стран достигает 20 % его ежегодной выплавки. Применение износостойкой наплавки позволяет примерно в два раза сократить потребности в запасных частях, что способствует решению комплексной задачи ресурсосбережения.

7.1 Газотермическая (газопламенная) наплавка

Газотермическая наплавка – это один из способов сварки плавлением, протекающей в условиях частичного оплавления основного металла под воздействием высокотемпературного пламени. Ее классифицируют по ряду основных признаков:

1) по типу горючего газа различают наплавку в среде ацетилена, пропан-бутана, природного газа (в основном применяют ацетилен с температурой горения $T = 3100...3300$ °С, у остальных газов температура горения ниже на 500–800 °С);

2) по виду наплавляемого материала – наплавку порошком, проволокой и прутком;

3) по соотношению расхода кислорода и ацетилена ($\alpha = O_2/C_2H_2$) – наплавку в *нейтральном* (нормальном) пламени, *восстановительном* (науглероживающем) и *окислительном* (таблица 7.1);

4) по способу транспортирования порошка в зону пламени – инжекторный и напорный;

5) по способу ввода порошка в зону пламени – через центральный канал горелки и с внешней стороны сопла.

Обычно наплавку (и сварку) деталей из сталей, чугуна и цветных металлов выполняют *нейтральным пламенем*. *Восстановительное пламя* используют при сварке и наплавке деталей из легированных и высокоуглеродистых сталей, а также при наплавке твердых сплавов на изношенную поверхность. *Окислительное пламя* применяют, как правило, при резке металлов, а также при сварке латуни.

Таблица 7.1 – Характеристика и области применения различных видов газового пламени

Вид пламени	Отношение O_2/C_2H_2	Температура пламени, °C	Область применения
Восстановительное (науглероживающее)	< 1,0	2700–3100	Наплавка и сварка низко- и среднеуглеродистых сталей, цветных металлов и сплавов
Нейтральное (нормальное)	1,0–1,25	3100	Наплавка и сварка твердых сплавов, высокоуглеродистых и легированных сталей
Окислительное	> 1,25	3100–3300	Резка и сварка латуни, чугунов и бронзы

Газопламенная наплавка позволяет упрочнять детали сложной конфигурации слоем минимальной толщины (0,1 мм и выше) без разбавления основным металлом, так как переходная зона соединения составляет всего 100–120 мкм. Разработано более 100 марок порошковых присадочных материалов. В основном это самофлюсующиеся сплавы на основе никеля и кобальта. В качестве присадочного материала используют порошки (20–160 мкм) с легирующими добавками бора и кремния, которые вызывают самофлюсующее действие, снижая температуру плавления порошковой смеси. Прочность сцепления с основой составляет 200–400 МПа. В зависимости от состава порошки применяют для заделки трещин в корпусных чугунных деталях, устранения неровностей поверхностей, а также для восстановления поверхностей.

Технологический процесс состоит из следующих стадий:

1) предварительный нагрев детали (с помощью горелки) до температуры

$$T_{п.н} = \begin{cases} 250...300 \text{ } ^\circ\text{C} - \text{с оплавлением наплавочного материала,} \\ 50...100 \text{ } ^\circ\text{C} - \text{без оплавления;} \end{cases}$$

2) нанесение подслоя (толщиной 0,05–0,15 мм) и его оплавление;

3) нанесение последующих слоев (с оплавлением газовой горелкой каждого слоя) до набора покрытия нужной толщины;

4) контроль за температурой и скоростью охлаждения детали (желательна низкая скорость во избежание образования трещин);

5) механическая обработка и контроль качества наплавочного слоя.

Комплект оборудования включает следующие основные элементы:

1) горелку (с дозатором материала);

2) компрессор;

3) баллоны с газами;

4) коммуникации.

Отечественные и зарубежные производители выпускают разнообразное оборудование для наплавки порошковых, проволочных и прутковых материалов, которое различается по степени механизации (ручные и механизированные), мощности и другим характеристикам.

Газопорошковая наплавка является наиболее эффективным способом газопламенной наплавки, который состоит в нанесении порошкового материала с его одновременным оплавлением. Нанесение порошкового материала на деталь производят с помощью специальной газопламенной горелки (рисунок 7.1), которая содержит устройство для подачи порошка в зону пламени.

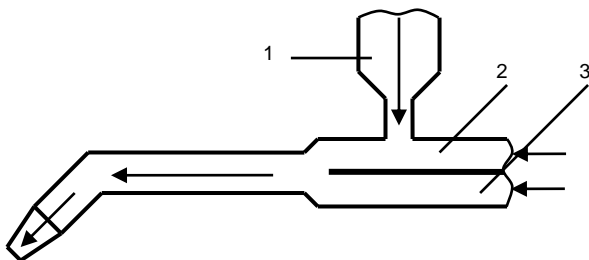
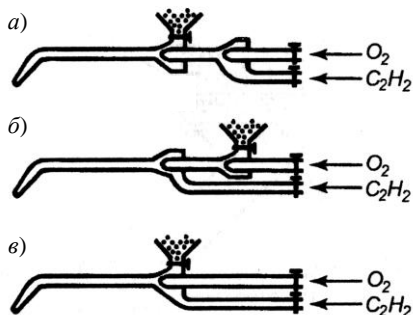


Рисунок 7.1 – Схема горелки для газопорошковой наплавки: 1 – бункер с порошком; 2 – канал для подачи кислорода; 3 – канал для подачи горючего газа

Важным фактором обеспечения качества наплавки является способ подачи порошка материала в зону наплавки. Горелки по конструктивному признаку подразделяют на инжекторные (низкого давления) и напорные (высокого давления). Их оснащают сменными наконечниками, выбор которых зависит от наплавляемого материала, технологии наплавки и сварки, формы и габаритов деталей.

На рисунке 7.2 представлены основные инжекторные схемы: порошок высасывается из бункера под действием разрежения, возникающего при скоростном прохождении горючих транспортирующих газов (кислорода и ацетилен).

Рисунок 7.2 – Схемы транспортирования наплавляемого порошка:
 а – с двухступенчатой инжекцией кислорода и ацетилена; б – с двухступенчатой инжекцией кислорода; в – с комбинированной инжекцией кислорода и ацетилена



К *достоинствам* газопламенной наплавки относятся:

- 1) восстановление мелких деталей сложной формы;
- 2) снижение опасности трещинообразования за счет предварительного подогрева детали;
- 3) простота и доступность.

К основным *недостаткам* следует отнести:

- 1) большие тепловые потери при обработке массивных деталей;
- 2) большую зону термического влияния;
- 3) расход дефицитного газа.

В зависимости от марки материала можно повысить прочностные характеристики, в том числе твердость до значений 50–60 HRC и 300–350 НВ.

Газопламенной наплавкой упрочняют детали из углеродистых, низко- и среднелегированных сталей (в том числе хромистых, хромоникелевых, хромованадиевых). Упрочнению подвергают зубчатые колеса, валы коробок передач и трансмиссий, детали рулевого управления дорожных машин и автотракторного оборудования.

7.2 Электротермическая наплавка

В электротермической наплавке *источником нагрева* является электрическая дуга (электрический разряд в газах, возбуждаемый и поддерживаемый между наплавляемой поверхностью и электродом). Электропроводность газа обеспечивается электронами и ионами, возникающими при его термической ионизации и упорядоченно движущимися в столбе дуги (степень ионизации составляет несколько процентов). Энергия частиц преобразуется в тепловую энергию и приводит к плавлению основного металла, а также электродного или другого присадочного материала.

Существует более 10 основных видов наплавки, отличающихся типом и природой наплавочных материалов, технологией наплавки. В их числе ручная наплавка покрытыми электродами, механизированная наплавка под флюсом и в среде защитных газов, электрошлаковая, вибродуговая и плазменная наплавки (схемы некоторых из них представлены на рисунке 7.3).

Толщину наплавленного слоя устанавливают в зависимости от условий работы детали и глубины износа ее поверхности.

Дуговая наплавка покрытыми электродами (см. рисунок 7.3, а, з). Для ручной наплавки используют покрытые электроды. Как было отмечено, они имеют стержень из низкоуглеродистой стали и покрытие, которое содержит шлакообразующие компоненты защиты, легирующие и другие наполнители (раскислители, а также вещества, стабилизирующие горение дуги).

В качестве примера приведем один из распространенных составов покрытия:

- шлакообразующий компонент (плавиковый шпат CaF_2);
- раскислитель (сплав Fe с Mn, Si, Ti, Al);
- связующее (жидкое стекло);
- легирующий компонент.

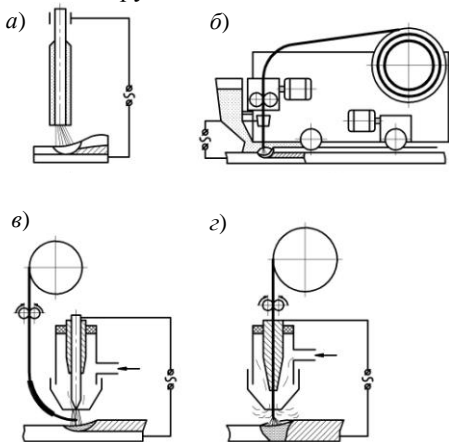


Рисунок 7.3 – Электротермические методы наплавки:

- а – ручная; б – автоматическая под слоем флюса; в – в среде защитного газа неплавящимся электродом; г – в среде защитного газа плавящимся электродом

Этот метод используют при наплавке среднеуглеродистых и легированных сталей (подвергнутых закалке и отпуску). Из-за отсутствия возможности проведения термообработки после наплавки применяют электроды с покрытием, содержащим добавки, обеспечивающие повышенную твердость (Fe–Cr, Fe–Mn, Fe–Si, карбид бора и др.). Восстановление деталей, работающих в абразивной среде, осуществляют наплавкой специальных литых и порошкообразных твердых сплавов (сормайта, стеллита). При этом используют наклонные и лежащие электроды, в том числе как стандартные, так и специальные электроды и пластины. В целом метод имеет ряд достоинств:

- 1) широкий выбор покрытых электродов;
- 2) возможность работы в полевых условиях;
- 3) низкая стоимость и транспортабельность оборудования;
- 4) наплавка на изделия сложной формы.

К основным недостаткам относятся:

- 1) низкая производительность (0,5–3,0 кг/ч);
- 2) нестабильность состава наплавленного металла.

Ручную дуговую наплавку применяют для восстановления деталей с большим износом. К ним относятся рабочие элементы машин (зубья экскаваторов и рыхлителей, щеки дробилок и др.), детали ходового оборудования, посадочные места корпусных изделий и шейки валов, элементы механических передач. По данным ВНИИЖТа, восстановительная наплавка в российском путевом хозяйстве в основном производится ручными способами.

Дуговая наплавка под флюсом (механизированная или автоматизированная). Ее осуществляют при полной (автоматизированная наплавка) или частичной механизации операций технологического процесса: подачи электрода (проволоки или ленты), перемещения дуги вдоль сварочного шва, подачи защитных и легирующих элементов в зону дуги.

Процесс наплавки происходит в дуге между электродом и деталью под слоем сыпучего флюса, который покрывает зону дуги и расплавленный металл. Сухой гранулированный флюс (слой толщиной 20–40 мм) защищает зону дуги и расплавленный металл от воздействия окружающего воздуха и пропускает выделяющиеся газы. В зоне дуги одновременно плавятся сварочный материал, основной металл и флюс. В качестве электродов используют:

- проволоку сплошного сечения (из углеродистых, легированных и высоколегированных сталей);
- порошковую проволоку (из легированных и высоколегированных сталей);
- ленты (сплошные спеченные, металлокерамические).

Для механизированной наплавки используют различные схемы: один электрод, многоэлектродную систему и электродную ленту.

На рисунке 7.4 представлена принципиальная схема установки для автоматизированной наплавки под слоем флюса. Для этих целей используют, как правило, модернизированные токарные станки, оснащенные наплавочными головками различных конструкций (в зависимости от вида наплавочного материала, габаритов детали и др.). Деталь фиксируется в патроне или центрах, а наплавочный аппарат – на суппорте станка.

К достоинствам дуговой наплавки под флюсом относятся:

1) производительность (от 2 до 30 кг/ч) в зависимости от схемы наплавки;

2) наплавка слоя с заданным составом и свойствами (качество не зависит от квалификации сварщика);

3) возможность получения слоя толщиной 1–10 мм.

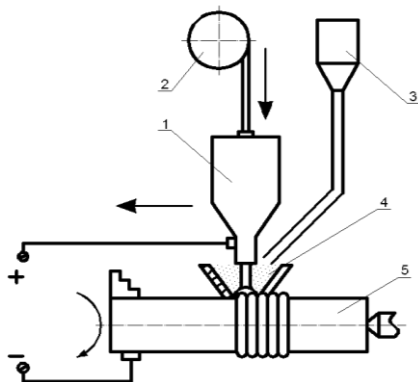


Рисунок 7.4 – Схема установки для автоматической наплавки под слоем флюса:

1 – наплавочный аппарат; 2 – кассета;

3 – бункер; 4 – приемник; 5 – деталь

Недостатки:

- 1) ручное удаление шлаковой корки;
- 2) ограничения по размерам детали ($\varnothing \geq 50$ мм) из-за высокой температуры разогрева металла;
- 3) коробление изделия из-за большого прогрева.

В качестве флюсов используют плавленные и неплавленные (керамические и спеченные) материалы и смеси.

Плавленные флюсы получают путем сплавления исходных компонентов, их размалывания и последующего гранулирования. Их основными компонентами являются марганцевая руда, кремнезем, полевой и плавиковый шпат. Керамические флюсы получают путем смешения порошков с жидким стеклом, гранулирования и последующего прокаливания. Спеченные флюсы получают спеканием исходных компонентов без их расплавления.

Керамическими флюсами с легирующими элементами (графитом, Fe–Mn, Fe–Si, Fe–Cr, Al) восстанавливают быстро изнашивающиеся детали дорожно-строительных машин (опорных катков, направляющих колес, осей, рабочих органов).

Флюсы должны обеспечивать устойчивое протекание наплавочного процесса, отсутствие пор и трещин в сварном шве, заданные прочностные свойства сварного шва и соединения в целом, а также легкую отделяемость шлаковой корки.

Для повышения качества наплавленного слоя используют вибрацию электрода, что позволяет снизить силу тока и устранить перегрев детали. Этот способ с успехом используют для восстановления многочисленных деталей круглого сечения подвижного состава, имеющих небольшой (до 3 мм) износ.

По данным ВНИИЖТа, автоматизированную наплавку под слоем флюса широко используют для восстановления гребней бандажей локомотивных и цельнокатаных вагонных колес. Этим способом на Российских железных дорогах ежегодно восстанавливают более 100 тысяч колесных пар.

Наплавка в среде защитных газов. Процесс наплавки протекает в условиях газового потока (под давлением) со стороны подачи наплавочного материала, что обеспечивает защиту зоны дуги и расплава от кислорода и азота воздуха. В качестве защитной газовой среды используют CO_2 , а также инертные газы (аргон Ar, гелий He и др.), часто для стабилизации дуги применяют смесь газов (80 % Ar + 20 % CO_2 или O_2).

В качестве электродов используют сплошную цельнометаллическую стальную проволоку (из углеродистой, легированной и высоколегированной стали), порошковые проволоку и ленты.

Наплавка в среде CO_2 в 1,2–1,5 раза экономичнее наплавки под слоем флюса. Она обеспечивает хорошее формирование шва с высокой плотностью при относительно небольшой глубине зоны термического влияния на основной металл. Углекислый газ предотвращает попадание кислорода и азота воздуха в зону горения электрической дуги. Но под действием дуги углекислый газ разлагается с образованием оксида углерода и атомарного кислоро-

да, оказывающего отрицательное влияние на расплав металла. Поэтому для подавления окислительного воздействия CO_2 в электродную проволоку вводят раскислители (марганец или кремний), которые реагируют с кислородом, образуя расплавленные оксиды-шлаки, которые всплывают на поверхность и не препятствуют процессу наплавки.

Принципиальная схема дуговой наплавки в среде CO_2 представлена на рисунке 7.5. Ее обычно выполняют на переоборудованном токарном станке, в патроне которого устанавливают деталь. Предварительно нагретый и обезвоженный CO_2 подают в головку наплавочного аппарата, регулируя давление и контролируя расход газа.

Имеется два варианта механизации:

- 1) механизированы все действия, включая подачу CO_2 и проволоки, перемещение горелки и детали;
- 2) механизирована подача CO_2 и проволоки; перемещение горелки и детали – вручную.

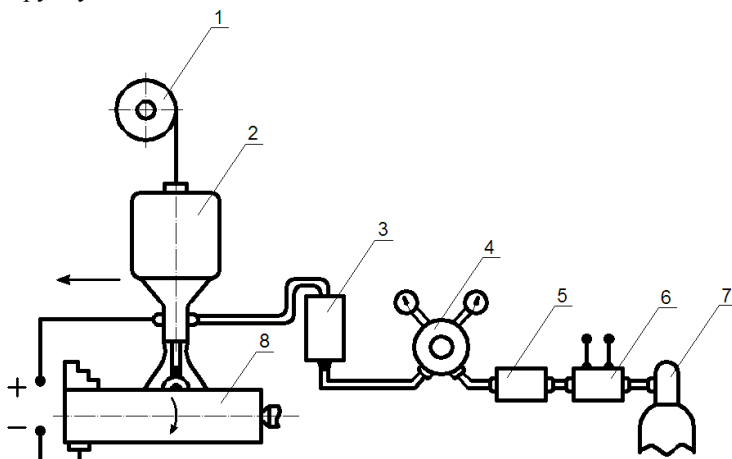


Рисунок 7.5 – Схема установки для дуговой наплавки в углекислом газе:
 1 – катушка с проволокой; 2 – наплавочная головка; 3 – расходомер; 4 – редуктор;
 5 – влагопоглотитель; 6 – подогреватель газа; 7 – баллон с углекислым газом; 8 – деталь

Для сварки и наплавки в среде углекислого газа выпускают различное автоматическое и полуавтоматическое оборудование, в том числе установки моделей А-547-У, А-547-Р, А-929, ПДПГ-30 и др. Для примера можно привести полуавтомат А-1197П, который имеет следующие характеристики:

сила тока	500 А
диаметр проволоки	1,6–3,0 мм
скорость подачи проволоки	90–900 м/ч
источник питания	выпрямитель ВДУ-504
масса	35 кг.

Инертный газ исключает использование флюса, поэтому способ особенно эффективен при наплавке цветных металлов, высоколегированных сталей и других материалов, чувствительных к окислению и азотированию.

К достоинствам следует отнести:

- 1) наплавку на тонкостенные и нежесткие изделия (без деформации и коробления), а также на детали малого диаметра ($10 < \text{Ø} < 50$ мм);
- 2) высокую производительность (1,5–8,0 кг/ч);
- 3) отсутствие трудоемкой операции по удалению шлаковой корки.

К недостаткам относятся:

- 1) сравнительно низкая твердость и износостойкость наплавочного слоя, поскольку нет легирования через флюс;
- 2) при использовании в качестве защитной среды углекислого газа его окисляющее воздействие требует введения в электродную проволоку раскислителей (легирующих добавок Si и Mn).

Наплавку и сварку в среде углекислого газа широко используют в ремонтном производстве, в том числе для ремонта корпусных тонколистовых деталей.

Электрошлаковая наплавка. Ее используют для восстановления наружных поверхностей цилиндрических деталей. Шлаковая ванна одной из своих стенок имеет восстанавливаемую деталь. Ток от электрода к детали проходит через жидкий шлак (расплавленный флюс, температура которого больше температуры электрода). В ванну добавляют нужные легирующие элементы.

На рисунке 7.6 представлена принципиальная схема электрошлаковой наплавки опорного катка (обода детали).

Восстанавливаемая деталь 7, габаритные диски 6 и кристаллизатор 1 образуют пространство, необходимое для создания шлаковой ванны. Перед началом наплавки ее заполняют расплавленным флюсом, нагретым до температуры 1600–1800 °С. В процессе наплавки в ванну через мундштук 4 подают электрод (сварочную проволоку) 3, а из дозатора 5 – легирующие добавки. Электрод и восстанавливаемую деталь подключают к источнику питания (трансформатору), в результате чего под действием электрического тока шлаковая ванна нагревается до температуры, необходимой для расплавления электрода, поверхности детали и легирующих добавок. Расплавленный металл скапливается в нижней части шлаковой ванны и, взаимодействуя с непрерывно охлаждаемыми стенками кристаллизатора, застывает с образованием на восстанавливаемой поверхности вращающейся детали наплавленного слоя 9. Его поперечное сечение определяется положением кристаллизатора относительно этой поверхности и расстоянием между дисками 6. После наплавки обычно проводят механическую и термическую обработку детали, например закалку ТВЧ.

К достоинствам электрошлаковой наплавки относятся:

- 1) самая высокая производительность – до 150 кг/ч;
- 2) низкий расход флюса;
- 3) отсутствие разбрызгивания шлака и присадочного материала.

Недостатки этого вида наплавки:

- 1) ограниченные технологические возможности по конфигурации и габаритам детали;
- 2) сложность оборудования;
- 3) необходимость термообработки после наплавки из-за снижения в околосшовной области ударной вязкости основного металла.

Этот способ экономически выгоден, если необходимо наращивать слои большой толщины при восстановлении больших партий однотипных деталей (плоских или цилиндрических).

Электрошлаковую наплавку используют для восстановления ходовой части (опорных катков, звеньев гусениц) и других деталей, работающих в абразивной среде в условиях сухого трения, а также шестерен коробок передач.

Вибродуговая наплавка. Ее особенностями являются вибрация электродной проволоки и подача охлаждающей жидкости в зону дуги. Частота вибрации составляет 50 или 100 Гц (при амплитуде 1–3 мм) и осуществляется электромагнитным или механическим вибратором.

Вибродуговую наплавку изношенных деталей осуществляют также под слоем флюса и в среде защитных газов.

Вибродуговую наплавку проводят с помощью автоматической вибродуговой головки (рисунок 7.7), которую устанавливают (вместо резцедержателя) на суппорте токарного станка. Она подает проволоку в зону наплавки и осуществляет ее вибрирование.

С помощью охлаждающей жидкости (3–5 % водного раствора соды или 10–20 % водного раствора технического глицерина) производится:

- 1) закалка наплавленного слоя без дополнительной термической обработки;
- 2) защита расплава металла от кислорода и азота воздуха;
- 3) предотвращение перегрева детали.

Вибродуговую наплавку используют для наращивания слоев практически любой толщины (до 3 мм за один проход) на изношенные поверхности деталей различной формы (рисунок 7.8) из углеродистой и малолегированной стали.

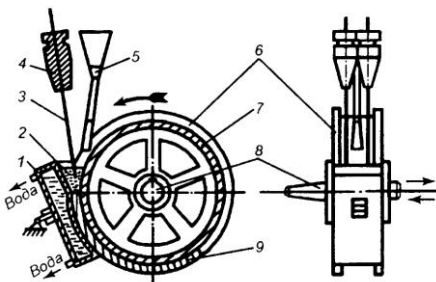


Рисунок 7.6 – Схема электрошлаковой наплавки:

- 1 – кристаллизатор; 2 – шлаковая ванна;
- 3 – электрод; 4 – мундштук; 5 – дозатор легирующих добавок; 6 – диски; 7 – наплавляемая деталь; 8 – оправка; 9 – наплавленный слой металла

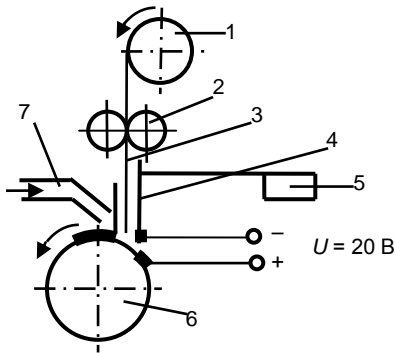


Рисунок 7.7 – Схема вибродуговой наплавки:

- 1 – кассета с проволокой; 2 – механизм подачи проволоки; 3 – проволока электродная; 4 – мундштук вибродуговой головки; 5 – электромагнитный вибратор; 6 – деталь; 7 – патрубок с охлаждающей жидкостью

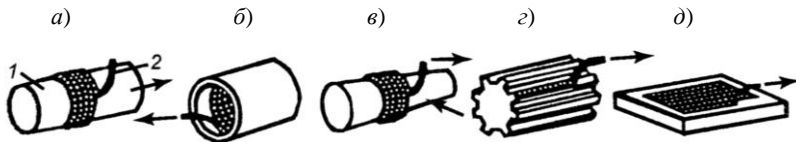


Рисунок 7.8 – Схемы вибродуговой наплавки изношенных поверхностей:
 а – наружных цилиндрических; б – внутренних цилиндрических;
 в – наружных конических; г – шлицевых; д – плоских; 1 – деталь; 2 – электрод

Достоинства вибродуговой наплавки следующие:

- 1) производительность в 4–5 раз выше, чем при ручной дуговой наплавке;
- 2) высокая безопасность работ;
- 3) отсутствие деформаций и коробления деталей.

Недостатком является снижение усталостной прочности (при переменных нагрузках) из-за образования закалочных структур и возникновения растягивающих напряжений в покрытиях.

Вибродуговую наплавку используют для наращивания шеек и шлицев валов, посадочных внутренних цилиндрических поверхностей и шлицев зубчатых колес, звездочек, шкивов и других деталей, поверхностей трения тормозных шкивов и барабанов, муфт и т. д.

Плазменная наплавка. При упрочнении и восстановлении деталей в зависимости от их формы и условий работы применяют несколько разновидностей плазменной наплавки, которые отличаются конструкцией оборудо-

Твердость и износостойкость покрытия при наплавке углеродистой проволоки имеют высокие значения без термической обработки. Основной металл почти полностью сохраняет свои физико-механические свойства, так как он нагревается до температур 60–80 °С, а зона термовлияния составляет всего 0,2–0,5 мм. Это в 5–10 раз меньше, чем при обычной электродуговой наплавке, при этом коробление деталей ниже в 6–12 раз. Вибрация позволяет производить капельный перенос наплавляемого металла.

вания, типом присадочного материала, способом его подачи на изношенную поверхность и электрической схемой подключения.

Основным элементом технологического оборудования является *плазмотрон*. Плазмотрон – это устройство для генерирования низкотемпературной плазмы ($T < 100000$ °С) путем продувания плазмообразующего газа через электрический дуговой разряд (точнее – через пламя сжатой электрической дуги, расположенной в узком канале). Затем в зону электрической дуги подают наплавочный (или присадочный) материал в виде порошка, проволоки и их комбинаций (в том числе двух проволок), который оплавляется и переносится на покрываемую деталь. Любой плазмотрон имеет два основных элемента: электрод (катод) и сопло. Разработано большое количество плазмотронов, которые классифицируют по следующим признакам:

1) *по способу охлаждения* электрода и сопла – с воздушным и водяным охлаждением;

2) *по типу дуги* – с дугой прямого, косвенного и комбинированного действия. Дуга прямого действия (рисунок 7.9, *а*) зажигается между электродом (катодом) и деталью (т. е. деталь включена в сварочную электрическую цепь). При этом наплавка производится плазменной струей. Производительность метода – 4–8 кг/ч. Дуга косвенного действия (рисунок 7.9, *б*) зажигается между электродом и соплом плазменной горелки, т. е. деталь не включена в сварочную цепь. При этом наплавка осуществляется плазменной дугой с производительностью 2–5 кг/ч. Дугу прямого действия используют чаще при сварке и наплавке, плазменно-механической обработке металла (реже – при резке), дугу косвенного действия – при напылении порошка, резке, поверхностной обработке неэлектропроводящих материалов. Наиболее распространенной является комбинированная схема, при которой между катодом и соплом зажигается вспомогательная сжатая дуга косвенного действия, которая при контакте с электропроводящей деталью образует сжатую дугу прямого действия. Ее используют в основном при сварке, наплавке и резке металлов. КПД при нагреве дугой прямого действия составляет 30–75 %, косвенного действия – 10–50 %;

3) *по типу плазмообразующей среды* – с инертной (Ar, He), восстановительной (H_2 , N_2 , NH_3) и окислительной (O_2 , CO_2 , H_2O и др.) средой. При использовании аргона температура плазменной струи составляет 30000 °С, при использовании азота – 12000 °С;

4) *по виду наплавляемого материала* – порошковым материалом, нейтральными и токоведущими проволоками (одной или двумя) и их комбинацией (порошок – проволока);

5) *по типу катодов* – с расходуемым, газозащищенным и пленкозащитным электродом. Самым распространенным является газозащищенный вольфрамовый (W) электрод.

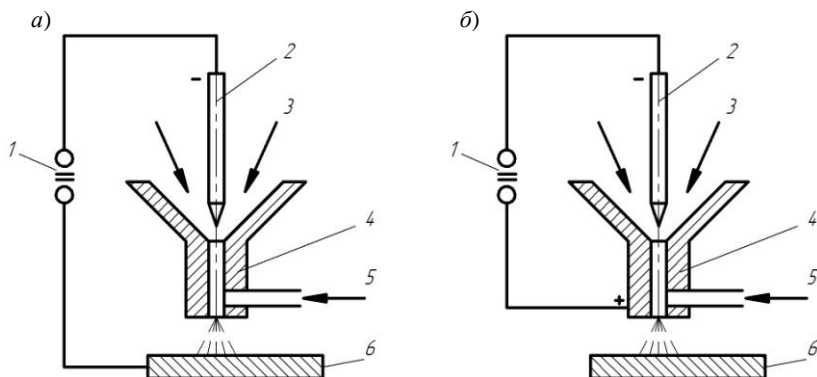


Рисунок 7.9 – Типы плазменной наплавки:

а – дугой прямого действия; *б* – дугой косвенного действия;

1 – источник постоянного тока; 2 – катод; 3 – плазмообразующий газ; 4 – сопло плазменной горелки; 5 – подача наплавляемого порошка; 6 – обрабатываемая деталь

В комплект оборудования входят следующие узлы: плазмотрон; механизмы: транспортирования порошковых или проволочных материалов, перемещения детали (или плазмотрона), колебания плазменной горелки; пульт управления (с измерительными, регулировочными и блокировочными устройствами); источник питания дуги; источник и приемник охлаждающей воды; коммуникации для газа, электроэнергии и воды.

Главным элементом плазмотрона является его сопловый (анодный) узел, который имеет системы охлаждения и ввода материала в плазменную струю. Через электроизоляционный блок анодный узел связан с катодным (стержневым электродом из вольфрама), также имеющим систему охлаждения. Напряжение между анодом и катодом составляет до 100 В при токе разряда 150–500 А. Следует отметить их малый ресурс: из-за разогрева он составляет всего 20–30 ч. Часто плазмотрон выполняют в виде пистолета с учетом конфигурации детали.

Большинство плазмотронов работает на постоянном токе (но есть плазмотроны, работающие на переменном и импульсном токе). В СССР (СНГ) серийно выпускали различные установки, в том числе:

- для сварки – типа УПС-301 (для деталей толщиной 0,5–3,0 мм), УПС-403, УПС-503 (для деталей толщиной 3–6 мм), УПС-804 и др.;
- наплавки – типа УПН-303, УПН-302, УПН-602;
- напыления – типа УПМ-5, УПМ-6, УПУ-3, УПУ-5.

В качестве примера на рисунке 7.10 представлена схема процесса наплавки с подачей двух плавящихся проволок в зону плавления. Между катодом 2 (из W) и медным водоохлаждаемым соплом 3, которое является

анодом, возникает дуга. Она возбуждается поэтапно. Затем дуга нагревает поступающий в сопло горелки рабочий плазмообразующий газ (например, смесь гелия и аргона, а в качестве защитного газа – аргон), который истекает из сопла в виде высокотемпературной струи, скорость которой достигает 1000–1500 м/с. Плазменная струя оплавляет одновременно деталь 5 и наплавочные проволоки 4, в результате чего на поверхности детали возникает наплавочный слой, толщина которого зависит от характеристик процесса наплавки. Наплавочную проволоку подогревают (пропусканием тока от автономного источника) и подают к соплу с помощью механизма протяжки.

Плазменную наплавку выполняют одиночными валиками при восстановлении цилиндрических деталей (по винтовой линии), а также с применением колебательного механизма. Использование поперечных колебаний плазменной горелки дает возможность получить широкий валик наплавочного слоя (до 60–70 мм) и тем самым увеличить производительность наплавки.

Технологический процесс включает следующие стадии:

- подготовку детали (обработку пескоструйванием и обезжиривание);

- нанесение наплавочного слоя (при расходе наплавки от 5 до 12 кг/ч);

- механическую обработку.

Преимущества плазменной наплавки заключаются в следующем:

- 1) относительно высокая производительность;
- 2) малая зона термовлияния и низкая деформация обрабатываемых деталей;
- 3) восстановление и упрочнение деталей нежестких конструкций;
- 4) наплавка тугоплавких металлов;
- 5) небольшая толщина переходного слоя комбинированного химического состава между деталью и наплавленным покрытием.

К недостаткам относятся высокая стоимость и сложность работ.

Плазменная наплавка порошковых материалов (*плазменно-порошковая наплавка*) на 30–50 % повышает производительность (по сравнению с ручной), на 50–70 % сокращает расход наплавочных материалов и на 50 % снижает потребление электроэнергии. В качестве примера можно привести

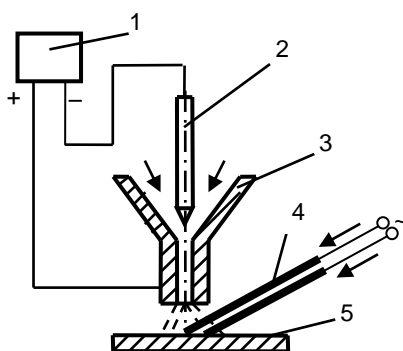


Рисунок 7.10 – Схема плазменной наплавки:

1 – источник постоянного тока; 2 – катод; 3 – сопло плазменной горелки; 4 – две плавящиеся проволоки (для их подогрева используют переменный ток); 5 – наплавляемая деталь

экономичные способы и устройства для плазменно-порошковой наплавки, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона (Украина).

Плазменно-порошковая наплавка позволяет значительно уменьшить разбавление наплавленного слоя основными компонентами материала детали. В частности, при наплавке бронзы на детали путевых машин из углеродистой стали зона переменного состава (между наплавляемым слоем и деталью) составляет всего 5–20 мкм.

Требуемая твердость и гарантированный химический состав обеспечиваются уже на расстоянии 0,3–0,5 мм от поверхности детали, что позволяет ограничиваться однослойной плазменной наплавкой. В то же время для обеспечения такого же качества при электродуговой наплавке требуется 3–4 слоя.

Незначительная глубина плавления основного металла (до 0,5 мм) и его низкое содержание в наплавленном слое (до 5 %) позволяют сохранить практически без изменения исходные свойства наплавленного материала. При этом наплавка косвенной дугой дает меньшую глубину проплавления основного металла и его меньшее содержание в первом наплавленном слое по сравнению с дугой прямого действия. Эффект низкой степени проплавления основного металла проявляется как для порошкового, так и для проволочного наплавочного материала.

Об этом свидетельствуют данные таблицы 7.2, в которой сопоставлены некоторые виды электротермической наплавки нержавеющей стали на детали из углеродистой стали. При наплавке плазменной струей проволоки глубина проплавления составляет всего 0,3–0,4 мм при содержании основного металла в первом слое наплавки 5–7 %. Для сравнения при автоматической дуговой наплавке проволокой под слоем флюса минимальная глубина проплавления основного металла достигает 1,2–1,5 мм. Установлено, что такую высокую чистоту наплавленного слоя (при плазменной наплавке) при других способах наплавки можно получить только лишь в четвертом – шестом слоях.

Таблица 7.2 – Влияние способа наплавки на состав наплавленного слоя

Наплавка	Содержание основного металла в наплавленном слое, мас. %
Ручная электродуговая	40–40
Автоматическая дуговая под слоем флюса	27
То же изолированной проволокой	17–18
То же ленточным электродом	8–15
Автоматическая плазменная токоведущей присадочной проволокой	5–7

В зависимости от требований, предъявляемых к поверхности восстанавливаемых деталей, плазменную наплавку производят порошковыми высоколегированными сплавами на основе железа, самофлюсующимися сплавами или порошками на основе Cr, В, Ni и Cu, а также цельнометаллическими проволоками.

Для наплавки в основном используют недефицитные газовые среды, в том числе такие активные газы, как углекислый газ и воздух. В этом случае для получения качественных наплавочных слоев нейтрализуют вредное влияние кислорода и азота за счет введения в наплавочные материалы сильных раскислителей (Si, Mn и Al).

Порошковые сплавы на основе железа в зависимости от марки обеспечивают твердость наплавленного слоя в пределах 40–60 HRC в сочетании с высокой износостойкостью при работе в абразивной среде. Самофлюсующиеся сплавы в зависимости от марки обеспечивают твердость наплавленного слоя в пределах 30–60 HRC, а также высокую коррозионную стойкость и износостойкость.

Плазменно-порошковая наплавка находит широкое применение для восстановления разнообразных деталей и узлов подвижного состава, путевых и дорожно-строительных машин. Ее используют при восстановлении таких узлов, как корпуса автосцепок, упорные плиты, тяговые хомуты, тарелки буферов, башмаки, опорные скользуны, различные втулки и др. Восстановленные детали обеспечивают существенное увеличение их износостойкости и повышение долговечности по сравнению с новыми деталями из традиционных материалов.

Эта же технология начинает активно использоваться для восстановления быстроизнашивающихся поверхностей строительных и дорожных машин, подвергаемых интенсивному ударно-абразивному износу (ножей отвалов бульдозеров и автогрейдеров, зубьев ковшей экскаваторов, лопаток бетоносмесителей, лопастей смесительных установок, долот бурильной техники и др.). Для их восстановления используют твердые порошковые сплавы на железной основе, которые позволяют в 2,0–3,5 раза увеличить их срок службы за счет повышения износостойкости рабочих поверхностей.

В условиях реального производства базовым оборудованием для плазменной наплавки являются токарный станок и сварочный выпрямитель, которые, как правило, имеются на любом предприятии. Для восстановления деталей машин используют упомянутые типы плазмотронов, отличающиеся надежностью, долговечностью и простотой обслуживания.

В таблице 7.3 представлены показатели производительности различных методов наплавки.

Плазменная наплавка обладает широкими возможностями применения любых наплавочных материалов, а также изготовления ответственных деталей из низкоуглеродистых сталей с упрочненной твердыми сплавами поверхностью, имеющей высокую износостойкость и коррозионную стойкость. Наплавка слоев с минимальной глубиной проплавления и реализация заданного (прогнозируемого) уровня физико-механических характеристик при малой толщине наплавленного слоя позволяет экономить дорогостоящие высокопрочные сплавы.

Таблица 7.3 – Ориентировочная производительность различных методов наплавки

Способ наплавки	Производительность, кг/ч
Ручная покрытыми электродами	0,5–3,0
Механизированная под флюсом:	
одним электродом	2–15
многоэлектродная	5–30
электродной лентой	5–30
Механизированная в углекислом газе	1,5–8,0
Механизированная порошковой проволокой:	
одним электродом	2–10
двумя электродами	5–20
Механизированная порошковой лентой	10–20
Вибродуговая	< 30
Электрошлаковая	< 150
Плазменная	5–15
Заливка жидким металлом	10
Наплавка погружением в расплав	35
Индукционная	< 20

Лазерная наплавка состоит в том, что нагрев слоя наносимого металла на поверхность детали производится концентрированным потоком монохроматического электромагнитного излучения, которое генерирует лазер. Для наплавки используют в основном два способа:

1) лазерную обработку предварительно нанесенного на деталь обмазкой слоя металла (обмазка – это состав, состоящий из порошкового материала и органического клеящего связующего);

2) газопорошковую наплавку – принудительную подачу порошка металла газовым потоком в зону луча лазера.

Для наплавки обмазкой используют самофлюсующиеся порошки, композиционные порошковые материалы (на основе Ni, Cr, В и Si), несамодлюсующиеся порошки сплавов на основе Fe, Ni, Co, твердосплавные материалы на основе карбидов (WC–Co, WC–Ni) и др.

Лазерная технология с использованием обмазки включает следующие операции:

- подготовку поверхности детали, включая обезжиривание;
- нанесение на поверхность тонкого слоя водного раствора клеящего состава (например, оксиэтиленцеллюлозы), который поглощает излучение и защищает расплав от окисления кислородом воздуха;
- напыление (или насыпание) на подготовленную поверхность детали необходимого количества самофлюсующегося порошка и его пропитку раствором;
- наплавку порошка на деталь лазерным лучом;
- последующее шлифование.

Наплавку осуществляют с оплавлением порошка и поверхностного верхнего слоя материала детали (толщиной 50–100 мкм), в результате чего в промежуточном слое происходит частичное перемешивание расплава. Это способствует высокой прочности сцепления наплавленного слоя с поверхностью детали.

Данный способ (предварительное нанесение обмазки и ее последующее оплавление) характеризуется малым расходом материалов: потери порошковых металлов снижаются, по сравнению с газотермическими технологиями в 30–40 раз. При этом лазерная наплавка благодаря высокому качеству наплавленного слоя позволяет уменьшить припуск на механическую обработку в 2–3 раза в сопоставлении с другими электротермическими технологиями.

Для газопорошковой лазерной наплавки наиболее подходящими являются порошки самофлюсующихся сплавов на основе никеля (колмонои) и кобальта (стеллиты), а также порошки этих сплавов с добавлением других легирующих элементов (карбидов вольфрама, титана, бора и комплексных карбидов – феррованадия, ферротитана). Подачу порошка в зону излучения производят транспортирующим газом, природа которого не оказывает влияния на самофлюсующиеся порошки. Однако при использовании несамофлюсующихся сплавов для защиты расплава от окисления воздухом используют инертные газы.

Для лазерной наплавки обычно применяют порошки узкого гранулометрического состава (40–60 мкм). Вместе с тем использование частиц в более широком диапазоне от 40 до 160 мкм также дает удовлетворительные результаты. При этом расплавление отдельной частицы происходит уже на обрабатываемой поверхности, поскольку времени ее нагрева в зоне лазерного луча (~1 мс) при переносе недостаточно для полного оплавления. (Известно, что время расплавления отдельной частицы в зоне лазерного луча составляет 10 мс). Время оплавления одной частицы во многом зависит от ее размера, поэтому для лазерной наплавки чаще применяют порошки узкого гранулометрического состава.

Этот вид лазерной технологии позволяет эффективно решать различные задачи: во-первых, производить наплавку и термообработку всего слоя покрытия за счет непрерывного сканирования лазерным лучом поверхности детали и, во-вторых, осуществлять при необходимости точечную наплавку слоя и термообработку локальных участков детали.

На рисунке 7.11 показаны схемы газопорошковой лазерной наплавки при различной подаче наплавляемого порошка в зону лазерного излучения.

Технология позволяет эффективно управлять процессом совмещения лазерной газопорошковой наплавки и лазерного оплавления покрытий.

Структура, формируемая при лазерной обработке (измельчение зерен, растворение хрупких карбидных фаз, образование пересыщенных твердых растворов), обеспечивает наплавленным слоям высокую твердость и изно-

состояigkeit. Микротвердость достигает 8000–9000 МПа в зависимости от материала, а износостойкость на порядок превышает эту характеристику слоев, обработанных ТВЧ.

Последующая обработка наплавленных деталей. При наплавлении деталей из средне- и высокоуглеродистых сталей при охлаждении на воздухе возможно растрескивание наплавленного слоя. Для предотвращения этого эффекта применяют снижение скорости охлаждения металла (путем газопламенного нагрева или помещением детали в печь).

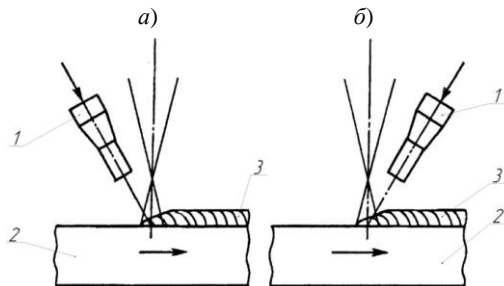


Рисунок 7.11 – Схемы лазерной газопорошковой наплавки с подачей порошка вслед (а) и навстречу (б) движению детали: 1 – лазер; 2 – деталь; 3 – наплавленный слой

Для релаксации остаточных напряжений используют отпуск ($T = 600 \dots 750 \text{ }^\circ\text{C}$ в зависимости от материала конструкции), механическую релаксацию напряжений и проковку (т. е. деформирование поверхностного слоя специальным инструментом).

Механическая обработка, как правило, сопровождается освобождением остаточных напряжений в наплавленном слое, что вызывает деформацию изделия. Поэтому детали, которые после наплавки требуют механической обработки, следует подвергать термической обработке для снятия напряжений. Детали с наплавками из твердых сплавов (их механическая обработка затруднена) подвергают смягчающей термической обработке для придания заданной твердости. Механическую обработку ведут при небольших подачах и малых глубинах резания.

Контрольные вопросы к разделу 7

- 1 Какие основные элементы включает комплект оборудования для газопламенной наплавки?
- 2 Какие защитные среды используют в процессах наплавки и как они влияют на свойства наплавленного слоя?
- 3 Дайте классификацию основных видов электротермической наплавки и опишите их достоинства.
- 4 Какие способы лазерной наплавки используют в технологии восстановления деталей и чем они различаются?
- 5 Классифицируйте методы плазменной наплавки по основным признакам.
- 6 Какие технологические преимущества имеет плазменная наплавка по сравнению с другими методами электротермической наплавки?

8

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ НАНЕСЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Н *апыление* (нанесение слоя покрытия) – это поверхностная обработка детали путем нанесения на нее тонкого слоя покрытия распылением жидкого металла струей сжатого воздуха *без расплавления металла детали*. Толщина покрытий может меняться в широких пределах: от сотых долей микрон до нескольких миллиметров.

Как правило, в результате нанесения покрытия материал детали практически не меняет своих свойств и структуры (в отличие от методов наплавки, а также термической и химико-термической обработки). Покрытия можно классифицировать по нескольким основным признакам:

- 1) по методу нанесения – газо- и электротермические;
- 2) по назначению – триботехнические (антифрикционные и фрикционные), антикоррозионные (коррозионностойкие), защитно-декоративные, а также специального назначения (жаростойкие, антизадирные и др.);
- 3) по природе материала – металлические и неметаллические (керамические);
- 4) по исходному агрегатному состоянию материала:
 - а) из газовой фазы;
 - б) из жидкой (из расплава, пасты, суспензии);
 - в) из твердой (в виде фольги, листа, отдельных частиц);
- 5) по температуре предварительного нагрева детали:
 - а) $T_{дет} > T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления материала покрытия);
 - б) $T_{фаз. превр} < T_{дет} < T_{пл}$ ($T_{фаз. превр}$ – температура фазового превращения материала покрытия);
 - в) $T_{дет} < T_{фаз. превр}$;
 - г) $T_{дет} \approx T_{окр. среды}$ ($T_{окр. среды}$ – температура окружающей среды).

Упрочнение сталей путем формирования на поверхности деталей покрытий является одной из наиболее распространенных технологий их восстановления, поскольку позволяет в широких пределах изменять показатели свойств упрочняемых поверхностей и повышать их износостойкость при важном условии – соответствующем подборе материалов основы детали и покрытия.

По условиям эксплуатации деталей машин к ним нередко предъявляются различные (порой взаимоисключающие) требования. Как правило, поверхность детали должна иметь высокую твердость и износостойкость, низкий коэффициент трения, а основа детали в объеме – высокую прочность и ударную вязкость (т. е. пластичность).

Реализовать эти требования можно нанесением на деталь покрытий с заданными свойствами. Их толщина фактически регламентируется величиной допустимого износа деталей в узлах трения машин, которая обычно не превышает нескольких десятых миллиметра (т. е. толщина покрытия должна несколько превышать толщину слоя износа).

Назначение покрытий выдвигает к ним требования, которые могут различаться в зависимости от области их применения. Поэтому наряду с общими требованиями к покрытиям имеются и специальные, учитывающие их функциональное назначение и специфику эксплуатации.

Общие требования:

1) высокая адгезионная прочность, т. е. прочность сцепления материала покрытия и материала основы детали;

2) стабильность состава и структуры материала в покрытии;

3) отсутствие отрицательного влияния на свойства материала основы детали;

4) высокий уровень физико-механических свойств (прочность, деформационная способность);

5) близкие значения коэффициентов (линейного) термического расширения материалов покрытия и основы;

6) ремонтпригодность покрытий.

Для покрытий триботехнического назначения (эксплуатирующихся в узлах трения) к специальным требованиям относятся:

1) стабильный коэффициент трения;

2) высокая твердость;

3) высокая износостойкость;

4) хорошая прирабатываемость;

5) оптимальная микрогеометрия поверхности покрытия.

В общем случае технологический процесс восстановления детали включает следующие основные операции:

– подготовку обрабатываемой поверхности детали;

– нанесение покрытия на поверхность детали;

– термообработку полученной системы «деталь – покрытие»;

– механическую обработку покрытия;

– контроль качества покрытий.

Подготовка поверхности обрабатываемой детали в свою очередь является многостадийным процессом и состоит из следующих операций:

– очистки поверхности методами и средствами в зависимости от вида жидких и твердых загрязнений (масел, смазок, технологических жидкостей, продуктов коррозии, окалина и др.);

– предварительной механической обработки восстанавливаемой детали (для устранения дефектов и придания правильной геометрической формы изношенным поверхностям);

– механической обработки для формирования заданной степени шероховатости для хорошего сцепления расплавленных частиц металла с обрабатываемой поверхностью;

– локальной защиты не подлежащих напылению поверхностей.

Преимущества напыления:

1) возможность нанесения покрытий на детали из различных материалов, в том числе из металлов и сплавов, неорганических (стекла, фарфора и др.) и органических (полимеров, дерева, ткани, бумаги, картона);

2) возможность напыления различных материалов с помощью одного и того же технологического оборудования;

3) отсутствие ограничений по размеру обрабатываемых изделий по сравнению с электролитическим осаждением или диффузионным насыщением (азотированием, цементацией и др.);

4) возможность нанесения покрытий толщиной в несколько миллиметров за достаточно короткий промежуток времени;

5) небольшая деформация деталей под влиянием напыления.

Недостатки напыления:

1) малая эффективность при нанесении на мелкие детали;

2) вредные выделения при нанесении порошковых материалов;

3) относительно низкая адгезионная прочность покрытий (см. таблицу 8.1);

4) затруднения в последующей механической обработке тонкослойных покрытий.

В таблице 8.1 представлены некоторые характеристики покрытий, сформированных различными методами.

Таблица 8.1 – Характеристики покрытий

Характеристика	Способ получения			
	электродуговая металлизация	детонационный	газопламенный	плазменный
Прочность сцепления, МПа	40	200	30	40
Пористость, %	25	1	15	15
Толщина, мм	10,0	0,3	2,5	3,0

Напыление осуществляют металлами, сплавами и композиционными материалами на их основе, а также керамическими материалами.

В исходном состоянии напыляемые металлические материалы применяют в виде прутков, проволоки и порошков. Проволоку и прутки используют при газопламенном, дуговом и электроимпульсном напылении, а порошки – при плазменном, детонационном, газопламенном и др.

Проволока дает возможность равномерной и непрерывной подачи материала в высокотемпературную зону горелки.

Порошковые материалы. Некоторые твердые и хрупкие металлы и сплавы, а также химические соединения, из которых обычными способами невозможно изготовить проволоку, применяют в виде порошков. Практически любой напыляемый материал можно перевести в порошкообразное состояние.

Форма, гранулометрический состав, сыпучесть порошковых материалов влияют на технологические режимы напыления и свойства покрытий. Размер частиц порошка выбирают в зависимости от характеристик источника тепловой энергии (горелки) и теплофизических свойств напыляемого материала (температуры плавления, удельной теплоемкости, плотности и других параметров).

Применение тонкодисперсного порошка обычно способствует повышению плотности напыляемого покрытия. При напылении порошка, состоящего из частиц разного размера, однородность и пористость покрытия ухудшаются из-за различной степени проплавления и скорости движения в струе крупных и мелких частиц. Поэтому для напыления обычно используют порошки достаточно узкой фракции, размеры частиц которых находятся в интервале 44–74 мкм.

В основном используют материалы, которые разделяют на следующие группы:

- 1) порошки металлов (Mo, W, Ni, Al, Cu и др.);
- 2) оксидные порошки (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , ZnO_2 и др., а также их комбинации);
- 3) порошковые сплавы на основе Ni, Cr, Cu, Co и др.;
- 4) композиционные порошки на основе W, Co, Ni, Cr, Al и др.;
- 5) механические смеси, которые представляют собой смеси порошков перечисленных групп (их применяют в основном для газопламенного напыления).

Для напыления используют более 200 типов различных порошковых материалов. В основном это сплавы (более 30 % от общего числа), механические смеси (20 %) и металлы (16 %).

Для деталей узлов трения применяют покрытия из материалов, обеспечивающих улучшение триботехнических свойств. В частности, Mo и W повышают износостойкость и ударную прочность; Co – износостойкость при высоких и нормальных температурах; Ni – эрозионную и коррозионную стойкость; стали (углеродистые и легированные) – абразивную износостойкость; Cu (в составе бронз) – коррозионную стойкость, износостойкость и стойкость к схватыванию при больших нагрузках; Al – жаростойкость.

Отличие напыления от наплавки заключается в том, что при напылении отсутствует промежуточный слой между напыленным покрытием и основным металлом. Как следствие, не меняются химический состав и свойства покрытия и основы, но прочность сцепления напыленного слоя с основой (их адгезионная прочность) имеет довольно низкие значения – не более 50–60 МПа. Это существенно ограничивает области применения покрытий в узлах трения, поэтому напыление используют для восстановления деталей:

1) из чугуна и алюминия, которые трудно поддаются восстановлению другими способами;

2) из любых сплавов, для которых не допускается их деформация и коробление;

3) не подвергающихся значительным динамическим нагрузкам;

4) эксплуатирующихся в основном в условиях усталостного изнашивания (однако имеются примеры использования покрытий, сформированных сверхскоростным газопламенным и плазменным напылением, при абразивном изнашивании и ударных нагрузках).

К таким деталям относятся корпусные детали дорожно-строительных и других машин, у которых изнашиваются посадочные места (гнезда блока под вкладыши коренных подшипников; гнезда картеров коробок передач; опорные буртики, посадочные пояски гильз цилиндров; поверхность нижней головки шатуна и др.).

Кроме того, к ним относятся валы из чугуна, легированных и конструкционных сталей с изношенными посадочными местами (валы коробок передач, ходовой части машин и др.).

8.1 Газотермическое (газопламенное) напыление

Газопламенное напыление покрытий является самым простым и экономичным способом восстановления деталей. Напыляемый металл (в исходном состоянии – порошок, проволока или пруток) оплавляют под воздействием высокотемпературного пламени, а затем распыляют и переносят на обрабатываемую поверхность детали струей сжатого воздуха.

Газопламенное напыление производят, как правило, восстановительным пламенем, что позволяет (по сравнению с электродуговой металлизацией) уменьшить выгорание легирующих элементов и обезуглероживание материала, тем самым повышая качество покрытия. Преимуществом газопламенного напыления является относительно небольшое окисление металла при распылении его расплава, что обеспечивает более высокую плотность покрытий.

Наибольшее распространение имеет газопламенное напыление порошковых и проволочных материалов, с помощью которого восстанавливают изношенные посадочные поверхности валов и корпусных деталей.

На рисунке 8.1 представлен вариант инжекторной схемы газопламенного напыления с использованием порошкового материала. Напыляемый порошок 3 под влиянием всасывающего воздействия смеси газов из канала 1 попадает через канал 2 под действием сжатого воздуха в сопло 4 и затем в зону пламени 5, далее расплавляется и переносится на обрабатываемую поверхность детали 7.

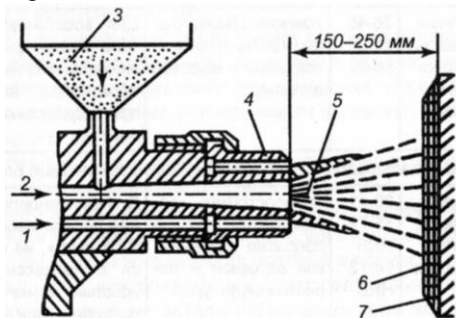


Рисунок 8.1 – Схема газопламенного напыления порошкового материала:

- 1 – канал подвода смеси ацетилена и кислорода;
 2 – канал подвода сжатого воздуха; 3 – напыляемый порошок; 4 – сопло; 5 – зона пламени;
 6 – покрытие; 7 – поверхность детали

Для газопламенного напыления используют то же оборудование, что и для газопламенной наплавки. На рисунке 8.2 представлен вариант схемы с использованием проволоочного материала (оптимальный диаметр проволоки составляет 1,5–5,0 мм). Проволока 3 поступает в горелку при помощи подающего механизма с постоянной скоростью. В горелке она расплавляется в зоне пламени 7, которое образуется при сгорании смеси ацетилена и кислорода, поступающих в смесительную камеру 1 по каналам 5 и 2. Далее поток сжатого воздуха (из канала 6) распыляет полученный расплав металла и переносит в виде факела 8 на обрабатываемую поверхность 9 детали.

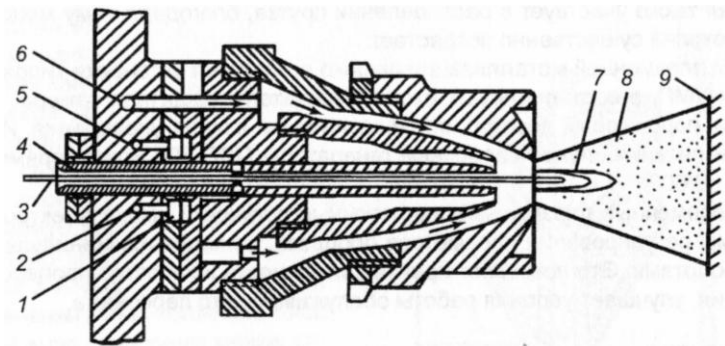


Рисунок 8.2 – Схема газопламенного напыления из проволоочного материала:

- 1 – смесительная камера; 2 – канал подвода кислорода; 3 – проволока; 4 – направляющая;
 5 – канал подвода ацетилена; 6 – канал подвода воздуха; 7 – зона пламени; 8 – факел расплавленных частиц металла; 9 – поверхность детали

В зависимости от назначения и условий эксплуатации детали используют два основных технологических процесса напыления:

- 1) без оплавления покрытия;
- 2) с последующим оплавлением покрытия.

Технологический процесс восстановления деталей газопламенным напылением *без оплавления покрытия* состоит из следующих операций:

- подготовка поверхности детали (очистка моющими средствами, механическая обработка для придания необходимой формы детали и степени шероховатости поверхности, обезжиривание) и изоляция мест, не подлежащих покрытию;
- предварительный нагрев детали до температуры 100–300 °С;
- нанесение подслоя из материала с высокой адгезионной способностью;
- нанесение основного слоя покрытия за несколько проходов (при общей толщине покрытия не более 2 мм);
- механическая обработка;
- контроль качества покрытия.

Технологический процесс восстановления деталей напылением с *оплавлением покрытия* содержит дополнительную операцию:

- оплавление нанесенного слоя покрытия при температуре до 1100 °С с помощью газовой горелки или другого источника тепла.

Напыление без последующего оплавления применяют для восстановления деталей с износом до 2 мм, не подвергающихся ударному воздействию и знакопеременным нагрузкам.

Напыление с оплавлением покрытия применяют для восстановления деталей, которые эксплуатируются в условиях ударных, контактных и знакопеременных нагрузок, поскольку оплавление способствует значительному увеличению адгезионной прочности соединения покрытия с деталью.

Д о с т о и н с т в а газопламенного напыления обусловлены следующими *технологическими особенностями*:

- 1) малым тепловым воздействием на материал детали, что позволяет наносить покрытия на легковоспламеняющиеся материалы (картон, древесину, пластмассы и др.);
- 2) набором толщины покрытий от 50 мкм до нескольких миллиметров;
- 3) возможностью регулирования режима горелки за счет управления химическим составом газовой среды;
- 4) высоким коэффициентом использования материала (0,60–0,95);
- 5) возможностью нанесения покрытий на детали без ограничения их размеров и конфигурации при наличии необходимых средств механизации;
- 6) легкостью и простотой обслуживания оборудования;
- 7) мобильностью оборудования, позволяющей осуществлять нанесение покрытий в полевых условиях;
- 8) возможностью автоматизации процесса напыления с небольшими затратами финансовых средств.

Недостатки газопламенного напыления, как и в любых других процессах, вытекают из их достоинств:

1) недостаточно высокая (до 50–60 МПа) прочность сцепления покрытия с основой;

2) довольно большая пористость (5–25 %), которая препятствует применению покрытий в качестве антикоррозионных без дополнительной обработки;

3) низкий коэффициент (в пределах 2–12 %) использования энергии газопламенной струи на нагрев порошкового материала.

Перспективы дальнейшего развития газопламенного напыления состоят в автоматизации процесса напыления, повышении качества покрытий (снижении пористости, увеличении адгезионной прочности), расширении номенклатуры напыляемых материалов, а также в создании отечественных высокоскоростных процессов напыления и оборудования для их осуществления.

Высокоскоростное газопламенное напыление подняло на новый уровень качества покрытий традиционные газопламенные процессы. В русскоязычном варианте эту технологию называют сверхзвуковым газопламенным напылением (СГПН). Она базируется на использовании сверхзвуковых потоков продуктов сгорания углеводородного топлива для нагрева и ускоренного переноса порошка материала покрытия. Топливо сжигают в горелках при повышенном давлении, которое в совокупности со специальным профилем канала горелки обеспечивает порошку скорость напыления, которая превосходит скорость звука примерно в пять раз. Результатом является низкая пористость (<1 %), высокая плотность и высокая адгезионная прочность покрытий.

СГПН целесообразно классифицировать по следующим основным признакам:

– *по природе топлива и окислителя* – воздушно-топливное и кислородно-топливное напыление;

– *по типу топлива* – на газообразном и жидком топливе;

– *по исходному состоянию напыляемого материала* – в виде порошка или порошковой проволоки;

– *по способу подачи напыляемого материала* – с осевой и радиальной подачей материала в зону горения;

– *по способу транспортирования материала* – напорным и инжекторным способом (нередко последний называют инъекционным или эжекторным).

Используют два вида СГПН: воздушно-топливное и кислородно-топливное напыление. На Западе высокоскоростное воздушно-топливное напыление обозначают аббревиатурой HVAF-spraying (от англ. High Velocity Air

Fuel Flame Spraying process), а кислородно-топливное напыление – HVOF-spraying (от англ. High Velocity Oxygen Fuel Flame Spraying process). Эти технологии активно развиваются во многих странах и фирмах.

Воздушно-топливное напыление (HVAF-технология) основано на разгоне и нагреве напыляемого порошка в высокоскоростном потоке продуктов сгорания углеводородного топлива в среде сжатого воздуха. Температура в камере сгорания составляет ~ 1900 °С, скорость газового потока – 1800 м/с. В этих условиях воздушно-топливная технология обеспечивает напыление качественных покрытий из металлических сплавов (на основе Al, Cu, Zn), на свойства расплава которых не влияет воздушная среда.

Кислородно-топливное напыление (HVOF-технология) имеет более широкие технологические возможности, поскольку температура в камере сгорания превышает 2000 °С при скорости газового потока более 2300 м/с. При таких режимах частицы напыляемых материалов имеют скорость в диапазоне 400–900 м/с, что способствует формированию покрытий высокого качества из самых различных материалов, в том числе тугоплавких (включая металлокерамику, оксидную и безоксидную керамику).

В установках кислородно-топливного напыления используют смесь кислорода с другими горючими газами (пропаном, пропиленом, этиленом, водородом и др.).

На рисунке 8.3 показана схема газопламенного нанесения покрытий из порошковых материалов. Эта схема содержит основные узлы и агрегаты установки, включая газопламенную горелку (распылитель), пульт управления, бункер с дозатором порошкового материала, емкости с горючими газами, регулирующую и управляющую аппаратуру. Ее можно использовать как для традиционного дозвукового, так и высокоскоростного сверхзвукового нанесения покрытий.

Осевая подача частиц порошка происходит непосредственно в камеру сгорания; радиальный вариант предусматривает введение материала в различные зоны высокотемпературных продуктов сгорания. В напорном способе применяют нагнетание транспортирующего газа (например, азота); инжекторный реализуют за счет засасывания порошка в зону влияния сверхзвуковой газовой струи. Большая часть серийно выпускаемых установок имеют напорную систему подачи напыляемого материала.

Технология с использованием жидкого горючего (керосина или дизельного топлива) экономически более выгодна, нежели технология с применением газообразного топлива. В частности, использование высококачественного керосина в 5–10 раз снижает стоимость процесса, а также способствует повышению безопасности работ.

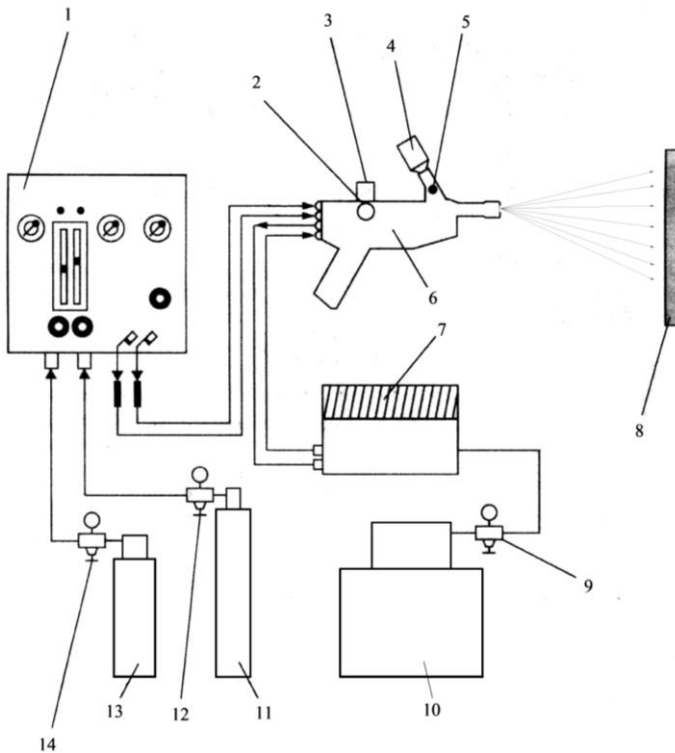


Рисунок 8.3 – Схема процесса газопламенного напыления:

- 1 – стойка с управлением подач газа и кислорода; 2 – регулятор подачи кислорода;
 3 – регулятор подачи газа; 4 – подача порошка; 5 – регулятор подачи порошка; 6 – горелка;
 7 – кулер циркулирующей воды; 8 – напыляемая деталь; 9 – редуктор воды; 10 – резервуар
 с водой; 11 – баллон с кислородом; 12 – редуктор кислорода; 13 – баллон с газом;
 14 – редуктор газа

Технологическое оборудование для реализации высокоскоростного напыления обычно включает устройство для создания сверхзвукового газового потока в виде камеры сгорания (с давлением продуктов сгорания до 1,0–1,5 МПа) с соплом Лавали и систему подачи напыляемого порошкообразного материала, а также систему управления, коммуникации и многое другое.

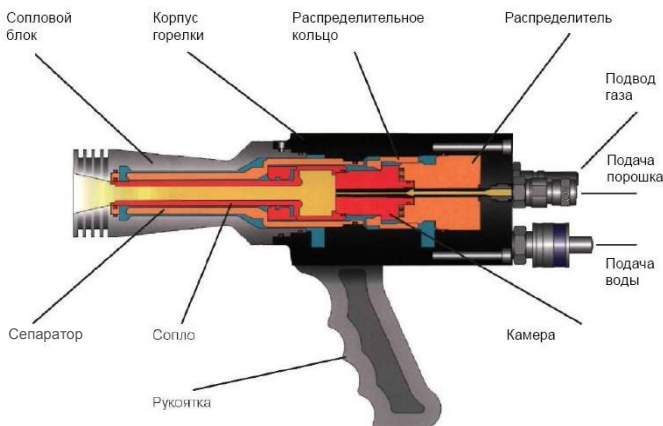
Отметим, что все установки для СГПН основаны на схеме жидкостного реактивного двигателя. Сопло Лавали представляет собой профильный канал, внутренняя поверхность которого состоит из двух усеченных конусов, сопряженных узкими концами, что позволяет реализовать сверхзвуковую скорость газового потока.

Главным узлом установок для СГПН является горелка, конструкция которой зависит от вида топлива, способа подачи порошка и др. На рисунке 8.4 представлены схемы горелок (распылителей) установок, работающих на газообразном (см. рисунок 8.4, *а*) и жидком (см. рисунок 8.4, *б*) горючем (керосине).

Ручной распылитель (см. рисунок 8.4, *а*) имеет водоохлаждаемый корпус, осевую подачу порошка в камеру сгорания и напорный способ транспортирования порошка. Для этого в корпусе имеются штуцеры для ввода и вывода охлаждающей жидкости, транспортирующего газа и напыляемого порошка.

Стационарный распылитель (см. рисунок 8.4, *б*) имеет систему жидкостного охлаждения, а также радиальную подачу порошка в зону горения, инжекторный способ транспортирования порошка в камеру сгорания и штуцеры для ввода кислорода и керосина.

а)



б)

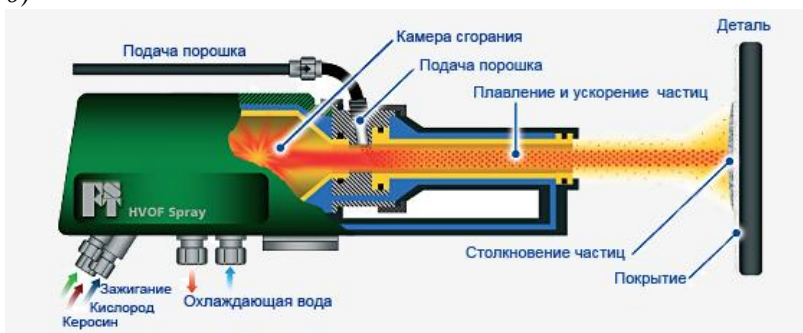


Рисунок 8.4 – Горелки установок для сверхзвукового газопламенного напыления, работающих на топливе:
а – газообразном; *б* – жидком

Ведущие компании по разработке технологического оборудования для нанесения покрытий (американские «Brauning Engineering Co» и «Diamond Jet», швейцарская «Plazma Technik», немецкая «Top Gun-UTP» и др.) разрабатывают составы порошкообразных материалов и установки для реализации сверхзвуковых процессов газопламенного напыления. Установки различаются видами применяемых газов и напыляемых материалов, а также схемами их подачи. Как правило, их оснащают компьютеризированными блоками управления.

На рисунке 8.5 представлены варианты конструкций горелок для кислородно-топливного напыления, в которых использованы инжекторная подача порошкового материала в зону горения и ускоряющие каналы различной конфигурации, в том числе сопла Лавалья.

Для СГПН используют порошки узкого гранулометрического состава, чтобы обеспечить высокое качество покрытий. Например, материалы, которые находят наибольшее применение, имеют размеры порошкообразных частиц в интервале 10–45 или 10–53 мкм. В их числе сплавы на основе карбидов вольфрама WC , в том числе содержащие Co , и хрома (Cr_3C_2); самофлюсующиеся сплавы на основе Ni , а также сплавы, содержащие $Ni-WC-Co$; стеллиты (сплавы на основе Ni и Cr), содержащие другие металлы (W , Mo), сплавы на основе Ni и Al , а также аустенитная сталь и др. Имеются сведения о положительном опыте применения порошковых проволок из сплавов на основе Cr .

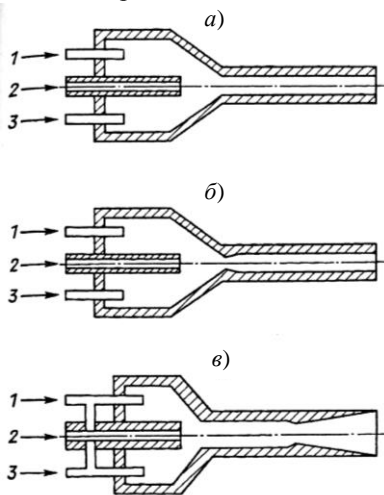


Рисунок 8.5 – Схемы конструкций распылителей для кислородно-топливного высокоскоростного напыления:

a – с околосзвуковым ускоряющим каналом цилиндрической формы; *б* – со сверхзвуковым каналом; *в* – со сверхзвуковым каналом и дополнительным нагревом порошка; 1 – подвод горячего газа; 2 – инжекторный подвод напыляемого порошка; 3 – подвод кислорода

Помимо покрытий из одного материала, нередко применяют комбинированные покрытия слоистой структуры, содержащей сплавы различного со-

става. Такие комбинированные (гибридные) покрытия обладают комплексом свойств, который затруднительно или вообще невозможно реализовать с использованием сплава одного состава.

Благодаря сверхзвуковой скорости подачи горючего газа и переноса частиц достигается высокое качество покрытий. Например, покрытия из сплава WC–Co имеют пористость всего 0,5 %, адгезионную прочность соединения со сталью – до 120 МПа, твердость – 1100–1300 НВ.

Высокоскоростное напыление, помимо высокой скорости напыляемых частиц в момент контакта с обрабатываемой поверхностью, отличается относительно низкой температурой разогрева детали и большой скоростью ее охлаждения (~100 град/с). Последний фактор обуславливает возникновение аморфной фазы в напыленном слое и реализации комплекса высоких прочностных характеристик покрытий. Большие скорости напыления частиц в момент соударения с обрабатываемой поверхностью способствуют развитию в покрытиях преимущественно сжимающих напряжений. Этот фактор позволяет напылять покрытия большой толщины с высокой адгезией. Например, покрытия высокого качества из карбидных сплавов могут иметь толщину до 6 мм.

8.2 Способы электротермического напыления

Их разделяют на дуговой, плазменный, электроимпульсный и высокочастотный. Для нанесения покрытий в основном применяют электрический дуговой разряд двух видов:

1) столб дуги имеет минимальные размеры, так как электроды постоянно сближаются (по мере их расхода). Этот вид дуги используют при дуговой металлизации;

2) столб дуги имеет большое межэлектродное расстояние. Этот вид используют в плазменном напылении.

Дуговая металлизация.

Сущность дуговой металлизации (рисунок 8.6) состоит в том, что в зону дуги непрерывно подают две изолированные, находящиеся под

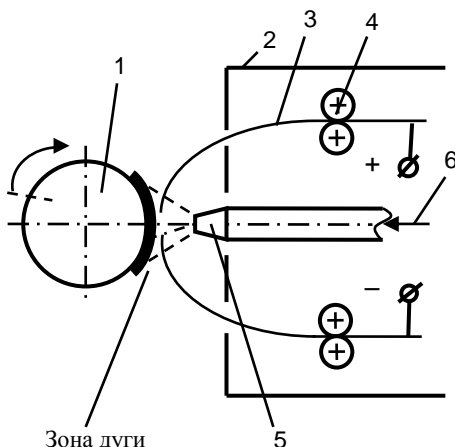


Рисунок 8.6 – Схема дуговой металлизации:
1 – деталь; 2 – кожух; 3 – проволоки; 4 – подающий механизм; 5 – сопло; 6 – сжатый газ

напряжением проволоки 3, при соприкосновении которых возникает электрическая дуга. Расплавленный в ней электродный металл распыляется струей сжатого (0,4–0,6 МПа) газа (воздуха или азота) 6 и осажается на поверхности детали. Для дуговой металлизации используют установки ручные (типа ЭМ-14, ЭМ-14М) и станочные (ЭМ-12, ЭМ-15), а также установку УДМ-2, в которую входят два металлизатора ЭМ-14М. Кроме того, используют установки, которые выпускают ведущие фирмы США, Швейцарии и других стран.

Ручной дуговой металлизатор (рисунок 8.7) выполняют в виде пистолета, в корпусе которого монтируют роликовый проволокопротягивающий механизм. Его приводят в действие электродвигателем. Масса ручного металлизатора составляет 2,0–2,5 кг. При силе тока 750 А и напряжении 40 В температура в зоне дуги достигает 6000 °С.

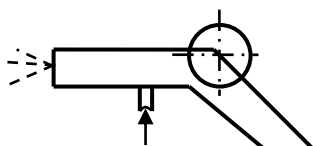


Рисунок 8.7 – Схема ручного дугового металлизатора

Как отмечалось, в качестве материала покрытий используют сплавы черных и цветных металлов. К ним относятся электродные сварочные и износостойкие наплавочные проволоки.

Как отмечалось, в качестве материала покрытий используют сплавы черных и цветных металлов. К ним относятся электродные сварочные и износостойкие наплавочные проволоки.

Напыление производят в два этапа:

- наносят подслоу, защищающий основной металл от окисления;
- наносят покрытие из требуемого сплава.

К достоинствам дуговой металлизации относятся:

- 1) относительно высокая производительность 3–20 кг/ч;
- 2) простота и универсальность (нанесение на детали любой формы);
- 3) толщина в широких пределах: от 0,1 до 10 мм;
- 4) сохранение структуры и свойств основного металла ($T_{\text{дет}} < 100$ °С).

Недостатками являются:

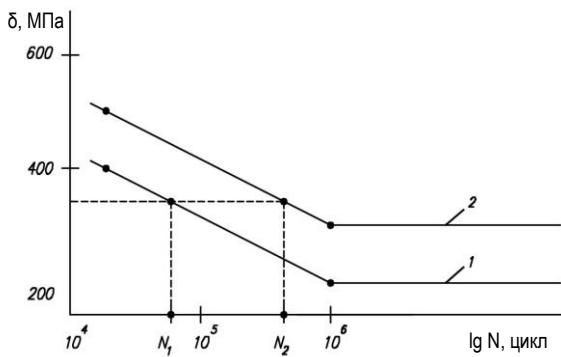
- 1) перегрев и окисление напыляемого металла;
- 2) выгорание части легирующих добавок, что необходимо компенсировать их увеличенным содержанием в исходном материале.

Восстановление дуговой металлизацией дает наибольший эффект для деталей, эксплуатирующихся в условиях стационарных нагрузок. При знакопеременных нагрузках эффективность дуговой металлизации не особенно велика. Об этом свидетельствуют кривые усталости (рисунок 8.8) для новых деталей и восстановленных дуговой металлизацией. Видно, что при одинаковых напряжениях долговечность восстановленных деталей значительно ниже, чем новых ($N_1 < N_2$).

Дуговую металлизацию нередко применяют в сочетании с высокоскоростным газопламенным напылением для создания композиционных по-

крытий улучшенного качества, которые затруднительно получить другими способами. В частности, электродуговым методом напыляют металлическую матрицу (например, Al или сплав Ni и Cr), а газопламенным – керамическую (например, карбид кремния SiC). Результатом является покрытие, которое имеет пониженную пористость и высокий уровень прочности сцепления с обрабатываемой поверхностью стали и между напыляемыми слоями.

Рисунок 8.8 – Влияние восстановления стальных образцов дуговой металлизацией на кривые усталости:
1 – восстановленных деталей;
2 – новых деталей



Плазменное напыление, как и плазменную наплавку, осуществляют с помощью плазмотрона.

Для плазменного напыления (плазменно-дуговой металлизации) используют разнообразное оборудование, в том числе плазменные установки типа УПУ (УПУ-3М, УПУ-3Д, УПУ-5) для напыления порошковых и проволочных материалов; установки УПМ (УПМ-5, УПМ-6) для напыления только порошковых материалов и др. Широко применяют автоматизированные и полуавтоматизированные плазменные установки, которые выпускают известные фирмы-производители США, Швейцарии, Германии и других стран, в их числе «Plasma-dain» и «Sulzer Metro» (США), «Plasma-Technik» (Швейцария).

Типичная схема плазменного напыления порошковых материалов представлена на рисунке 8.9. Плазменную струю получают, пропуская плазмообразующий газ через электрическую дугу, создаваемую между катодом 1 и анодом, выполненным в виде сопла 7. Порошок напыляемого сплава размещают в баке 2 и через трубку 4 потоком транспортирующего газа подают к соплу 7 в плазменную струю. В струе происходит оплавление и ускорение частиц порошка, после чего расплавленные частицы осаждаются на детали 8.

Качество покрытий зависит от стабильности работы порошкового питателя, который состоит из бункера с порошком 2, дозирующего устройства 5, вибратора 6, предотвращающего сводообразование порошка в баке, и трубопроводов.

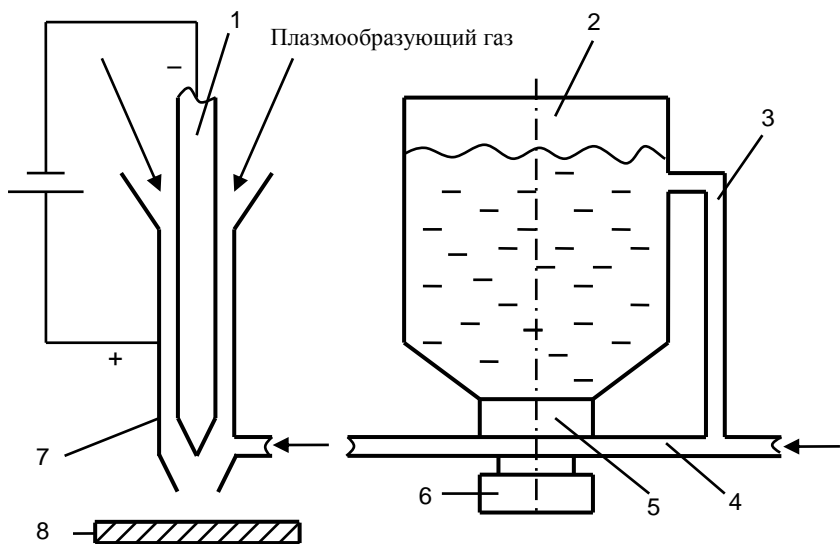


Рисунок 8.9 – Принципиальная схема плазменного напыления порошковыми материалами:

1 – катод; 2 – бункер с порошком; 3 – трубка уровня давления; 4 – трубка ввода транспортирующего газа; 5 – дозирующее устройство; 6 – вибратор; 7 – сопло; 8 – деталь

Плазменные технологии обеспечивают качественное напыление различных по теплостойкости и температуростойкости материалов, в том числе металлов и их окислов, карбидов, нитридов и боридов, полимеров, а также их комбинации, создавая гибридные покрытия со специальными свойствами. Соответственно, плазменным напылением можно получать покрытия самого различного назначения, включая теплозащитные и жаростойкие, электроизоляционные и токопроводящие, износостойкие и антикоррозионные.

Технологический процесс восстановления в общем виде включает следующие стадии:

- подготовку порошка;
- подготовку поверхности детали (очистку моющими средствами, термообработку при температуре 250–300 °С, дробеструйную или пескоструйную обработку с последующим обезжириванием);
- нанесение подслоя;
- нанесение основного слоя покрытия (при расходе материала наплавки от 5 до 12 кг/ч);
- оплавление нанесенного слоя покрытия (для самофлюсующихся сплавов);
- механическую обработку.

От *подготовки порошка* зависит качество покрытий (сплошность, плотность и др.); она включает подбор порошка заданной дисперсности и гранулометрического состава, а также его сушку при температуре 150–200 °С.

Подготовка поверхности детали может включать механическую, физическую и химическую обработку поверхности, в том числе очистку поверхности от загрязнений, масла, технологических жидкостей и др. Механическая подготовка поверхности детали обеспечивает необходимую степень шероховатости, от которой зависит прочность сцепления покрытия с деталью и, в конечном счете, его работоспособность и долговечность.

Подслоя должен иметь развитую шероховатую поверхность и прочное сцепление с материалом детали. Его толщина обычно составляет 0,05–0,15 мм. В качестве материала подслоя используют сплавы, обеспечивающие его высокую адгезионную прочность. Для этого напыление подслоя производят порошками нихрома, молибдена, сплавами и композиционными материалами на основе Ni–Al.

Напылением можно получать покрытия толщиной до 2,0–2,5 мм. Однако с увеличением их толщины значительно возрастает величина остаточных растягивающих напряжений, что сказывается на долговечности покрытий (снижается сопротивление усталости, возникают трещины и т.п.). Поэтому для каждого типа плазменных покрытий следует подбирать оптимальную толщину. При этом необходимо учитывать припуск на механическую обработку, который для обработки шлифованием составляет 0,1–0,4 мм.

Для плазменного напыления наиболее часто используют сплавы, содержащие Mo и W, а также нихром и самофлюсующиеся сплавы (на основе Ni, Cr и Ni, Cr и Co, содержащие добавки В и Si).

Плазменные покрытия имеют довольно большую пористость (до 15 %), что обуславливает их низкую прочность, которая в несколько раз меньше прочности наплавленных и гальванических покрытий. Одним из способов увеличения их когезионной (а также и адгезионной) прочности является оплавление напыленных покрытий, вследствие чего на поверхности детали формируется промежуточный слой небольшой толщины (0,01–0,05 мм). В результате прочность сцепления покрытия после оплавления достигает 400 МПа, а когезионная прочность напыленных слоев приближается к прочности наплавленных материалов. Этот способ дает наибольший эффект для покрытий из самофлюсующихся твердых сплавов. В их числе сплавы на основе Ni, имеющие в составе раскислители (Si и В), обеспечивающие при оплавлении взаимодействие с кислородом воздуха с образованием боросиликатных шлаков. Оплавление покрытий обеспечивает образование промежуточного слоя, в составе которого имеются компоненты как покрытия (Si и В), так и основы детали (Fe).

В СНГ также выпускают установки для плазменного напыления и наплавки. На рисунке 8.10 показана типичная схема такой установки, которая включает необходимое оборудование и коммуникации.

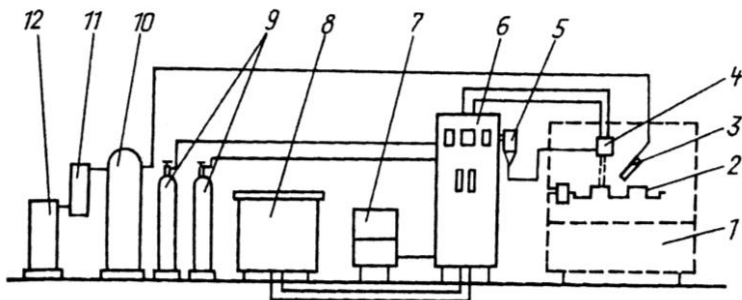


Рисунок 8.10 – Схема установки для плазменного напыления:

1 – вытяжной шкаф; 2 – напыляемая деталь; 3 – насадка подачи сжатого воздуха для охлаждения детали; 4 – плазмотрон; 5 – порошковый питатель; 6 – пульт управления; 7 – устройство для подачи охлаждающей воды; 8 – источник питания; 9 – баллоны с газом; 10 – ресивер; 11 – масловодоотделитель; 12 – компрессор

Оборудование для плазменного напыления постоянно совершенствуется, в том числе порошковые питатели. Для обеспечения равномерной подачи порошка напыляемого материала в плазмотрон используют питатели различного типа (с псевдооживлением порошка, с его свободным перемещением под действием силы тяжести, а также с механическим воздействием на порошок). В качестве дозирующих устройств используют шнеки, роторы и барабаны, оснащенные приспособлениями для подачи воздушно-порошковой смеси.

Плазменное напыление позволяет решить задачу восстановления и повышения износостойкости деталей машин с помощью тонкослойных покрытий в условиях трения скольжения. Широкий спектр материалов для покрытий позволяет подобрать нужный состав с учетом режимов эксплуатации узлов трения. Как правило, износостойкость плазменных покрытий повышается с увеличением твердости материала покрытий, в частности, при введении в материал твердых компонентов в виде карбидов, боридов и феррооксидов. Данные рисунка 8.11 свидетельствуют о важной роли хрома (позиции 3–9) в обеспечении высокой износостойкости плазменных покрытий. Видно, что наилучшие результаты получены для покрытий из стеллитов (хромокобальтовых сплавов) и колмонов (хромоникелевых сплавов).

Значительные преимущества плазменных покрытий подтверждают данные рисунка 8.12, на котором представлены зависимости момента сил трения для различных материалов. Видно, что покрытия из твердых сплавов на железной основе значительно снижают момент сил трения (на 30–35 %) и уменьшают износ в 1,5–1,7 раза.

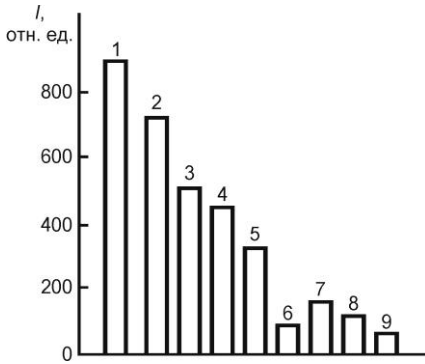


Рисунок 8.11 – Износ плазменных покрытий при сравнительных испытаниях в условиях сухого трения: 1 – из низкоуглеродистой стали; 2 – из молибденсодержащей стали; 3 – из хромомолибденовой стали; 4–6 – из стеллитов; 7–9 – из колмоноев

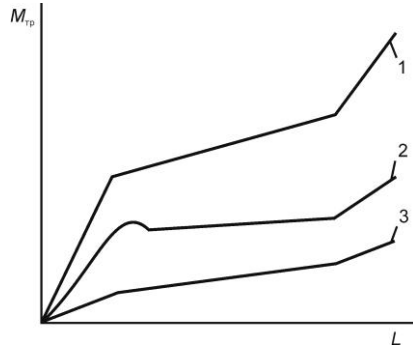


Рисунок 8.12 – Зависимость момента сил трения от пути трения для различных углеродистых сталей: 1 – сталь 45 (со смазкой); 2 – Ст3 с плазменным покрытием (без смазки); 3 – Ст3 с плазменным покрытием (со смазкой)

Традиционная область применения плазменных покрытий – это восстановление деталей, работающих в условиях усталостного разрушения без ударных динамических нагрузок. В их числе восстановление подвижных и неподвижных соединений (посадочных мест валов коробок передач, ходового оборудования, корпусных изделий и др.), деталей двигателей внутреннего сгорания (поршневых колец, впускных и выпускных клапанов, опор коренных подшипников, поверхностей гильз цилиндров и др.).

Покрытия, оплавленные после их нанесения, имеют более высокую плотность, низкую пористость и более высокий уровень прочностных характеристик. Поэтому такие плазменные покрытия из самофлюсующихся сплавов на основе никеля и железа применяют для восстановления деталей, эксплуатирующихся в условиях ударно-абразивного воздействия. Имеются сведения о положительном опыте применения плазменных покрытий рабочих органов дорожно-строительных машин, в том числе зубьев ковшей экскаваторов, ножей отвалов автогрейдеров и бульдозеров: плазменное напыление покрытий из твердых сплавов увеличивает срок службы рабочих органов этих машин в 2–3 раза.

Завершающей стадией технологического процесса является *механическая обработка покрытий*, которая должна учитывать их особенности (толщину, структуру, прочностные свойства и др.). Основным методом механической обработки принято считать шлифование, которое оказывает наименьшее силовое воздействие на тонкослойные покрытия. В ряде случа-

ев используют точение, фрезерование, сверление и другие методы. При этом режимы обработки не должны создавать значительные деформации и нагрузки, вызывающие растягивающие напряжения, которые существенно снижают работоспособность системы «деталь – покрытие».

Перспективы развития плазменного напыления состоят в повышении качества покрытий, которые в большинстве случаев имеют низкую адгезию из-за больших внутренних напряжений, высокую пористость и относительно низкий уровень прочностных свойств. Для решения этой задачи развивают следующие направления:

1) комплексную автоматизацию процесса напыления путем создания блочно-модульных систем с компьютерным и микропроцессорным управлением, обеспечивающим высокую стабильность покрытиям;

2) совершенствование плазмотронов путем повышения их удельных показателей мощности;

3) совершенствование методов нанесения покрытий пониженной пористости и высокой адгезии за счет использования сверхзвуковых плазмотронов;

4) расширение номенклатуры напыляемых материалов, создание комбинированных многослойных покрытий, обеспечивающих комплекс улучшенных эксплуатационных свойств.

В таблице 8.2 сопоставлены технико-экономические показатели различных методов получения защитных и износостойких слоев металла на цилиндрических деталях. Коэффициент производительности рассчитан по формуле

$$K_{п} = t_{р.д}/t_i,$$

где $t_{р.д}$, t_i – время, затраченное на нанесение покрытия соответственно ручной дуговой наплавкой и сравниваемым способом.

В целом технология покрытий развивается в нескольких направлениях. Во-первых, разрабатываются новые материалы для создания многофункциональных покрытий; во-вторых, совершенствуется технологическое оборудование; в-третьих, расширяют автоматическое управление процессами напыления с обеспечением обратной связи для получения покрытий с заданными показателями свойств.

В настоящее время наиболее перспективным представляется управление напылением с помощью разработанных на Западе «интеллектуальных» систем типа IPM (Intelligent Processing of Materials), которые обеспечивают выбор наиболее эффективных путей регулирования свойств покрытий с учетом взаимосвязи параметров технологического процесса и характеристик напыляемых материалов, а также формы и габаритов обрабатываемых деталей.

Таблица 8.2 – Техничко-экономические показатели методов нанесения покрытий

Метод нанесения покрытия толщиной до 1 мм	Производительность		Толщина слоя покрытия, мм	Припуск на механическую обработку, мм	Концентрация основного металла, %	Прочность сцепления, МПа	Деформация детали после нанесения	Минимальный диаметр детали, мм	Коэффициент производительности
	кг/ч	см ² /мин							
Наплавка:									
под слоем флюса	2–15	16–24	0,8–10,0	0,8–1,5	27–60	650	Значительная	45	1,62–1,45
вибродуговая	0,5–4,0	8–22	0,3–3,0	0,7–1,3	8–20	500	Незначительная	10	0,85–0,72
в среде CO ₂	1,5–4,5	18–36	0,5–3,5	0,7–1,3	12–45	550	Значительная	15	1,82–1,77
электроконтактная	1,0–2,8	50–90	0,2–1,5	0,2–0,5	0	300	Незначительная	15	2,3–2,1
порошковыми проволоками	2–9	16–36	1–8	0,6–1,2	12–35	600	Значительная	20	1,75–1,54
ручная газовая	0,15–2,0	1–3	0,4–3,5	0,4–0,8	5–30	480	»		0,73–0,58
плазменная	1–12	45–72	0,2–5,0	0,4–0,9	5–30	490	Незначительная	12	2,2–1,9
ручная дуговая	0,4–4,0	8–14	0,5–4,0	1,1–1,7	20–40	500	Значительная		1,0
аргонодуговая	0,3–3,6	12–26	0,2–2,5	0,4–0,9	6–25	450	Незначительная	12	2,1–1,7
Напыление:									
газопламенное	0,4–4,0	35–80	0,2–2,0	0,3–0,7	0	25	Отсутствует		1,68–1,47
плазменное	0,8–12,0	40–90	0,2–3,0	0,03–0,06	0	45	»	10	1,76–1,68
Гальванические покрытия:									
хромирование	0,007–0,085	40–60	0,01–0,30	0,3–0,6	0	450	Отсутствует	5	0,32–0,22
железнение	0,011–0,90	100–150	0,1–3,0	0,15–0,2	0	400	»	12	1,93– 1,77

8.3 Нанесение электролитических покрытий

Электролитическое (гальваническое) нанесение покрытий (хромирование, оставление, никелирование, меднение и др.) применяют для восстановления изношенных поверхностей деталей, а также для получения защитно-декоративных покрытий.

Для получения металлического покрытия на детали используют два основных метода: во-первых, формирование покрытия из электролита, содержащего соль этого металла; во-вторых, формирование покрытия с использованием расходуемого анода, изготовленного из металла покрытия.

В основе нанесения гальванических покрытий по первому методу лежит процесс электролиза (рисунок 8.13), который протекает между двумя электродами 3 и 5 при прохождении постоянного тока через электролит.

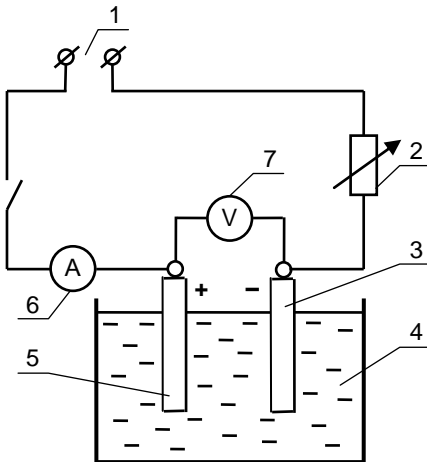


Рисунок 8.13 – Схема электролитического нанесения покрытий:

1 – источник питания; 2 – регулируемое сопротивление; 3 – катод (деталь); 4 – ванна с электролитом; 5 – анод; 6 – амперметр; 7 – вольтметр

контролировать соответствующими приборами.

Электролитический метод используют как для получения основного покрытия, так и для создания подслоя с последующим нанесением основного слоя металлического (или полимерного) покрытия.

Количественно процесс электролиза описывается законами Фарадея, с помощью которых производят расчет времени нанесения или толщины покрытий в зависимости от основных характеристик процесса.

Катодом является восстанавливаемая деталь 3. В качестве электролита используют раствор солей металла, который необходимо осадить в виде покрытия на детали 3. Под действием постоянного тока молекулы раствора электролита разделяются на катионы (положительно заряженные ионы), которые перемещаются к катоду 3, и анионы (отрицательно заряженные ионы), которые перемещаются к аноду 5. На катоде 3 катионы разряжаются и осаждаются на нем в виде нейтральных атомов металла, в результате чего из них формируется покрытие. Свойства покрытия зависят от электрических характеристик процесса электролиза (плотности тока и величины напряжения), которые необходимо

Время нанесения покрытия можно определить с учетом выбранной плотности катодного тока I_k по формуле

$$t = 10 \frac{h\rho}{C I_k \eta},$$

где h – заданная толщина слоя, мм;

ρ – плотность металла, г/см³;

C – электрохимический эквивалент, г/А·ч,

$$C = \begin{cases} 0,324 - \text{Cr}; \\ 1,042 - \text{Fe}; \\ 1,180 - \text{Cu}; \\ 1,095 - \text{Ni}; \end{cases}$$

η – КПД ванны (или выход металла по току),

$$\eta = \begin{cases} 0,12 - \text{Cr}; \\ 0,80...0,95 - \text{Fe}; \\ 0,95...0,98 - \text{Cu}; \\ 0,90...0,95 - \text{Ni}. \end{cases}$$

Электролиз в ванне из электролита осуществляют в двух основных вариантах:

- 1) с растворимым анодом;
- 2) с нерастворимым анодом.

В первом варианте катодом является обрабатываемая деталь, анодом чаще всего – пластины из наносимого металла (железо, никель, медь и др.). В этом случае металл анода растворяется. Во втором варианте в качестве нерастворимых анодов используют уголь, свинец, платину. В этом случае раствор соли наносимого металла в электролите необходимо постоянно обогащать для обеспечения непрерывности процесса.

Толщина покрытий, а также их равномерность зависят от напряженности электрического поля и распределения его силовых линий вблизи обрабатываемой детали. Для получения равномерного по толщине покрытия используют фигурные аноды, копирующие форму детали, а также дополнительные аноды и токонепроводящие экраны, изменяющие конфигурацию электрического поля возле катода. Для получения качественных покрытий площадь поверхности анода должна в 2–3 раза превышать площадь поверхности катода. Для крупногабаритных деталей используют несколько анодов для формирования равнотолщинных покрытий.

При ремонте чаще всего используют хромирование и железнение.

Хромирование – это электролитическое осаждение хрома на поверхность стальной детали. Этот процесс используют в ремонтном производстве

для восстановления и упрочнения изношенных поверхностей деталей, а также для нанесения износо- и коррозионностойких покрытий.

Процесс хромирования можно классифицировать по следующим признакам:

1) *по назначению покрытий* – износостойкие, антикоррозионные и защитно-декоративные;

2) *по составу электролита* – сульфатные, саморегулирующиеся и тетраокроматные;

3) *по типу покрытий* – гладкие и пористые;

4) *по наличию емкости для электролита* – в ванне и без ванны;

5) *по конструкции ванны* – в стационарной, накладной и передвижной;

Хромирование является сложным процессом. Он включает три основные стадии:

– подготовку детали к нанесению покрытий;

– хромирование;

– обработку детали после хромирования.

Подготовка детали в свою очередь содержит следующие операции:

1) *механическую обработку поверхности*; в зависимости от назначения покрытия деталь подвергают дробе- или пескоструйной обработке, шлифуют или полируют;

2) *обезжиривание* в органических растворителях;

3) *обработку в щелочном растворе* (70–100 г NaOH на 1 л H₂O при плотности тока $I = 5 \dots 10$ А/дм² и температуре $T = 65 \dots 80$ °С);

4) *активацию* химическим или электрохимическим способами для уничтожения пленок окислов. Электрохимическая активация поверхности детали представляет собой ее анодное декапирование: непосредственно в ванне перед хромированием меняют полярность электродов (деталь становится анодом) и осуществляют протравливание ее поверхности при подаче постоянного тока между электродами;

5) *изоляцию* поверхностей детали, не подлежащих восстановлению, с помощью специальных приспособлений (чехлов, экранов или футляров из непроводящих материалов, в том числе полимерных или композиционных).

Хромирование осуществляют на детали – катоде. Оно состоит из следующих операций:

– собственно хромирования;

– промывки детали водой и ее сушки;

– предварительного технического контроля.

Хромирование производят в основном в стационарных ваннах в электролитах различного типа. На практике чаще всего используют сульфатные, саморегулирующиеся и тетраокроматные электролиты.

Самыми распространенными являются *сульфатные электролиты*. Их основные компоненты – это хромовый ангидрид CrO_3 и серная кислота H_2SO_4 , между которыми должно выдерживаться соотношение 100 : 1. В зависимости от режимов (рисунок 8.14) (плотности катодного тока I_k и температуры ванны) получают три вида покрытия:

- а) молочные – обладают высокой износостойкостью, но малой твердостью;
- б) блестящие – хрупкие, но кислотоупорные;
- в) матовые (серые) – обладают большой твердостью, но малой износостойкостью.

В качестве примера можно привести электролит в виде раствора хромового ангидрида CrO_3 и серной кислоты H_2SO_4 в воде; анодом служит свинцовая пластина; $U = 6 \dots 8 \text{ В}$, $I \leq 50 \text{ А/дм}^2$, материалом ванны является свинец или пластик.

В таблице 8.3 представлены соотношения компонентов сульфатного электролита, влияющие на тип покрытий.

Твердость и износостойкость хромовых покрытий зависит от параметров электролиза.

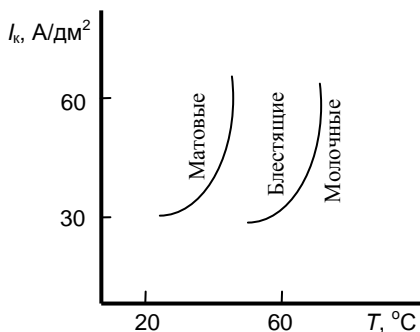


Рисунок 8.14 – Зависимость типа покрытия от режимов нанесения

Таблица 8.3 – Тип покрытия в зависимости от соотношения компонентов в электролите

Тип покрытия	CrO_3 , г/л	H_2SO_4 , г/л
Износостойкое	150	1,5
Защитно-декоративное	300–400	3,0–4,0
Универсальное	200–250	2,0–2,5

В таблице 8.4 показано влияние основных характеристик процесса (плотности тока и температуры) на микротвердость хромовых покрытий.

Таблица 8.4 – Влияние параметров процесса на твердость покрытий

Вид покрытия	Плотность тока, А/дм^2	Температура, °С	Микротвердость, МПа
Блестящее	15–25	47–52	7500–11000
Молочное	25–35	66–70	5400–6000
Матовое	15–25	15–25	3500–4000

Блестящие хромовые покрытия по твердости (7500–11000 МПа) превосходят закаленные (5000 МПа) и азотированные (7500 МПа) стали.

Блестящие и матовые покрытия используют в основном для восстановления неподвижных сопряжений. При восстановлении подвижных сопряжений гладкие покрытия плохо удерживают смазку на поверхности детали, поэтому в этих случаях целесообразно применять *пористые хромированные покрытия*. Их получают механическим и электролитическим способами.

Для получения механическим способом пористого покрытия поверхность детали перед хромированием подвергают обработке накаткой, посредством которой формируется сетка углублений.

В случае электролитического способа уже полученное покрытие подвергают анодному травлению. Таким образом, получают пористую структуру точечного, канальчатого и сетчатого типов.

Хромирование в *саморегулирующихся электролитах* находит все более широкое применение, поскольку обеспечивает более высокий выход хрома по току, хорошую рассеивающую способность и более высокий уровень эксплуатационных свойств покрытий по сравнению с сульфатным хромированием. Эти достоинства обусловлены автоматическим поддержанием оптимального соотношения концентрации компонентов в процессе хромирования. Это достигается за счет введения в водный раствор хромового ангидрида солей (сернистого стронция SrSO_4 и кремнефтористого калия K_2SiF_6) в количестве, превышающем их растворимость. Поэтому избыток этих солей присутствует в электролите в виде осадка. При изменении концентрации CrO_3 происходит или растворение, или увеличение этого осадка, что обеспечивает поддержание постоянного соотношения между компонентами и стабилизацию состава электролита. Эти электролиты отличаются более высокой плотностью катодного тока, что позволяет в 1,3–1,5 раза повысить производительность хромирования по сравнению с сульфатными электролитами.

Тетрахроматные электролиты относятся к холодным электролитам (с рабочей температурой 17–23 °С). Процесс хромирования ведется при высокой плотности тока (50–100 А/дм²) и выходом по току 30–33 %, что позволяет получать качественные пластичные покрытия с большой производительностью и низкими внутренними напряжениями. Тетрахроматные электролиты обеспечивают более высокую кроющую способность, чем рассмотренные ранее сульфатные и саморегулирующиеся электролиты. Так, покрытия толщиной всего 8–10 мкм, обладающие низкой пористостью, используют в качестве защитных покрытий деталей простой формы. При выборе холодных электролитов следует учитывать необходимость применения холодильных агрегатов для поддержания заданной температуры.

Обработка детали после хромирования состоит из следующих операций:

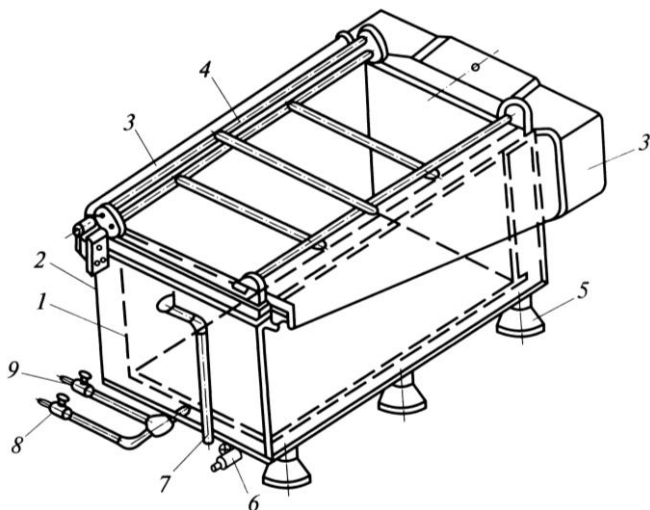
- 1) шлифование и полирование;
- 2) обработка струей керосина (под давлением 0,5–0,6 МПа) в случае пористого покрытия и его сушка;
- 3) окончательный технологический контроль.

Так как хромовая ванна имеет малую рассеивающую способность, то большое значение при хромировании имеет правильное расположение анодов и экранов. Они должны обеспечивать равномерную плотность тока по всей хромируемой поверхности. Припуск на механическую обработку при хромировании обычно составляет 0,05–0,10 мм.

Выбор метода хромирования зависит от габаритов и формы обрабатываемых деталей. Для небольших деталей несложной конфигурации или плоских конструкций используют стационарные ванны с одним или двумя анодами. Для крупных деталей, имеющих конфигурацию тел вращения, применяют стационарные ванны, оснащенные двумя или четырьмя анодами. Для крупногабаритных деталей в зависимости от формы и участков хромирования используют стационарные, передвижные и накладные ванны.

На рисунке 8.15 представлена типичная конструкция стационарной ванны, обеспеченной внешним подогревом. Она состоит из двух баков 1 и 2, между которыми имеется водяная рубашка, которая сохраняет постоянство температуры электролита.

Рисунок 8.15 – Стационарная ванна для хромирования:
 1 – внутренний бак;
 2 – наружный бак;
 3 – вентиляционный кожух;
 4 – токопроводящие штанги;
 5 – электроизоляционные опоры;
 6 – кран для выпуска воды из зарубашечного пространства;
 7 – водосливная труба;
 8, 9 – краны паровой и водяной магистрали



На рисунке 8.16 показаны принципиальные схемы передвижной и накладной ванн, последнюю устанавливают непосредственно на деталь.

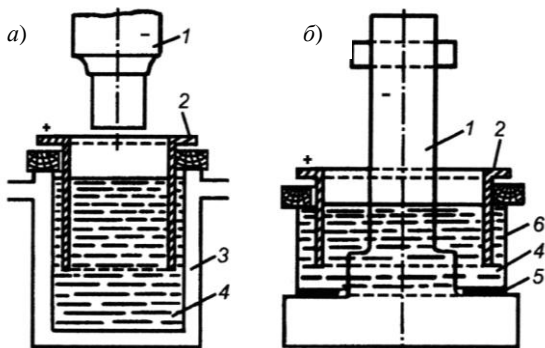


Рисунок 8.16 – Передвижная (а) и накладная (б) ванны для хромирования крупных деталей:

1 – деталь (катод); 2 – анод; 3 – ванна с двойными стенками; 4 – электролит; 5 – уплотнительный элемент; 6 – ванна

Помимо ванн, применяют различные варианты «безванного» способа:

1) в качестве ванны используют емкость (объем) самой детали или применяют небольшие переносные ванны с проточным электролитом;

2) используют струйное хромирование детали катода, на которую подают струю электролита из свинцового наконечника (анода) распылителя.

К достоинствам хромированных покрытий относятся: – высокие показатели твердости, износостойкости и коррозионной стойкости;

- сохранение структуры и свойств основного металла;
- относительно высокая адгезионная прочность.

К недостаткам следует отнести:

- небольшую (до 0,35 мм) толщину покрытий с высокими показателями свойств;
- низкую (15–30 мкм/ч) скорость и производительность процесса;
- необходимость больших площадей рабочей зоны;
- значительное (на 15–25 %) снижение усталостной прочности восстановленных деталей.

Для повышения износостойкости стальных деталей наносят покрытия из хрома толщиной до 100–400 мкм. При этом износостойкость хромированных деталей по сравнению с необработанными возрастает в 5–15 раз. Электролитический хром обладает высокой коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения, высокой твердостью (1000–1100 НВ) и жаростойкостью. При тщательной подготовке поверхности прочность сцепления хрома со сталью, чугуном и никелем (при испытаниях на сдвиг) достигает 300 МПа.

Упрочнение хромированием широко применяют в машиностроении для повышения износостойкости цилиндров двигателей, поршневых колец, плунжерных пар топливных насосов дизелей и других деталей. При этом толщина покрытий зависит от назначения детали и условий эксплуатации. При хромировании деталей, работающих без динамических нагрузок, толщина покрытий не превышает 100 мкм; для деталей узлов трения машин и меха-

низмов (шеек валов и зубчатых колес, соединительных пальцев, валиков, шеек осей, реек, червяков) она составляет 100–200 мкм; деталей прессовых и других неразъемных соединений, гнезд шарикоподшипников – до 400 мкм; цилиндров двигателей внутреннего сгорания – не более 20–50 мкм.

Железнение – это электролитическое осаждение железа из водных растворов хлористого или серноокислого железа. Поскольку электролитически осажденное железо по свойствам (твердости, прочности и износостойкости) приближается к свойствам среднеуглеродистой стали, этот процесс нередко называют *осталиванием*.

Железнение как восстановление изношенных деталей производят в хлористых, серноокислых и смешанных ваннах. При пропускании постоянного тока через электролит ионы железа осаждаются на катоде (детали). При этом происходит растворение анода. После железнения деталь с покрытием подвергают пластическому деформированию, что позволяет существенно повысить усталостную прочность и износостойкость.

Структура и свойства покрытий зависят от плотности тока и режима электролиза, состава и температуры электролита. Наиболее высокие показатели (твердости, износостойкости и усталостной прочности) имеют покрытия, полученные в горячих хлористых ваннах, содержащих хлористые железо, натрий и марганец, а также соляную кислоту HCl ($T = 60 \dots 80$ °С, $I_k = 10 \dots 50$ А/дм²). В качестве растворимого анода применяют малоуглеродистую сталь.

К достоинствам относятся:

- 1) большая (до 3 мм) толщина;
- 2) высокая производительность (в 10 раз выше, чем у хромирования);
- 3) применение дешевых электролитов и растворимых анодов;
- 4) высокий (80–85 %) выход по току (при хромировании – 12–15 %) и низкая энергоемкость процесса.

Недостатки:

- 1) невысокие твердость и износостойкость;
- 2) необходимость цементации с закалкой и отпуском для повышения износостойкости.

Железнение используют при ремонте для восстановления изношенных рабочих поверхностей чугуновых и стальных деталей (шеек валов, пальцев и др.), посадочных поверхностей валов и осей, гнезд под подшипники, а также для упрочнения поверхностей деталей из низко- и среднеуглеродистых сталей, которые по каким-либо причинам нельзя закалывать.

Наряду с осаждением чистого железа применяют электролитические *легированные покрытия*, обладающие повышенной износостойкостью и коррозионной стойкостью. Для их получения в электролит вводят добавки (хлориды никеля и кобальта или другие компоненты). Изменяя состав элек-

тролита, температуру и плотность тока, можно регулировать эксплуатационные свойства покрытий.

При выборе деталей для восстановления железнением необходимо учитывать, что их усталостная прочность (из-за остаточных напряжений растяжения) снижается на 10–20 %. Прочность сцепления покрытия с основным металлом достигает 120 МПа. Для устранения хрупкости, повышения твердости и прочности покрытия детали после железнения следует подвергать низкому отпуску (при температуре 300–350 °С).

Композиционные электрохимические покрытия являются перспективным направлением повышения износостойкости восстанавливаемых деталей. Они представляют собой двухфазные системы, состоящие из основного металла и порошкообразных частиц модифицирующих компонентов. Для получения композиционных покрытий в состав электролита на основе солей Ni или Cr вводят дисперсные (порошкообразные) частицы модификатора. В процессе электролиза эти частицы чисто механически увлекаются катионами (при постоянном перемешивании электролита-суспензии) и осаждаются на восстанавливаемой поверхности, наращиваясь слоем основного металла.

В качестве второй дисперсной фазы используют порошки различных металлов, сплавов, химических соединений, полимеров и других материалов, дисперсность которых изменяется в широких пределах: от 0,01 до 100 мкм (предпочитают частицы диаметром 1–3 мкм). В их числе порошки металлов (никеля, железа, кобальта, молибдена, ванадия и вольфрама), их оксидов, карбидов, нитридов и боридов, что позволяет значительно упрочнить покрытия. Для повышения износостойкости покрытий на основе Ni используют SiC, Al₂O₃, Cr₂O₃, TiB₂, для обеспечения эффекта самосмазывания покрытий из Ni и Cr применяют частицы твердых смазок (графита, MoS₂, ПТФЭ). Такие покрытия обеспечивают увеличенный ресурс элементов коробок передач и сцепления автотранспортных средств и дорожных машин.

Электрохимические полимерные покрытия также представляют интерес для машиностроения, поскольку обеспечивают поверхности обрабатываемой детали комплекс свойств, недостижимых другими способами. Принцип их получения состоит в том, что в ванну с электролитом вводят раствор или расплав мономера. При прохождении постоянного электрического тока происходит электрохимически инициируемая полимеризация или поликонденсация с образованием на поверхности электрода (детали) осадка высокомолекулярного соединения. В некоторых случаях в раствор или расплав вводят дополнительно модификаторы для реализации необходимых эксплуатационных свойств покрытий.

Контрольные вопросы к разделу 8

- 1 Классифицируйте металлические покрытия по основным признакам.
- 2 Назовите требования к покрытиям триботехнического назначения.
- 3 Определите основные технологические различия между наплавкой и напылением металлических слоев.
- 4 При каких нагрузках допустимо эксплуатировать покрытия, полученные газо- и электротермическим способами?
- 5 Какие материалы используют в качестве покрытий?
- 6 Назовите особенности и свойства покрытий, получаемых при низко- и высокоскоростном газопламенном напылении.
- 7 Опишите достоинства и недостатки электротермических методов напыления.
- 8 Дайте классификацию электролитического нанесения хромовых покрытий по основным признакам.
- 9 Как получить пористые хромовые покрытия?
- 10 Какие детали предпочтительно восстанавливать железнением?

9

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСАДОК

Одним из типичных дефектов деталей и сборочных единиц, приобретенных в процессе эксплуатации машины, является нарушение посадки между сопряженными поверхностями деталей. Напомним, что *посадкой* называют характер соединения деталей, который определяется наличием зазора или натяга между деталями. При этом независимо от конфигурации соединяемых элементов один элемент (охватываемую деталь) принято называть валом, а другой, т.е. охватывающую деталь, – отверстием.

Различают посадки *с зазором*, *с натягом* и *переходные*, в которых возможен как зазор, так и натяг. В посадке с зазором диаметр вала меньше диаметра отверстия. Такое соединение допускает перемещение деталей друг относительно друга. В посадке с натягом диаметр вала больше диаметра отверстия. Такое соединение обеспечивает неподвижность деталей после их сборки.

Нарушение посадок характеризуется изменением зазоров в сопрягаемых элементах и самих посадок. Неисправности сопряжений происходят в основном из-за нарушения посадок и регулировок, а также ослабления креплений. В подвижных соединениях нарушение посадок приводит к увеличению зазоров в шарнирах, радиального и бокового зазоров в зубчатых зацеплениях, в сопряжениях «втулка – вал». Недопустимые изменения соосности, перпендикулярности и параллельности осей приводят к нарушению зубчатого зацепления, перекосу опор и другим нежелательным эффектам. В неподвижных соединениях нарушение посадок приводит к уменьшению натягов и ослаблению креплений, что сопровождается увеличением динамических нагрузок, потерей жесткости и нарушению сопряжений.

Для восстановления посадки используют механическую обработку, которая позволяет устранить износ и другие повреждения рабочих поверхностей деталей, а также следующие способы:

- наращивание изношенных поверхностей;
- восстановление под ремонтный размер (или способ ремонтных размеров);
- постановка дополнительной ремонтной детали (компенсатора износа);
- восстановление заменой рабочей части детали.

Методы наращивания изношенных поверхностей различными технологическими приемами (наплавкой, напылением, электролитическим осаждением и др.) рассмотрены в соответствующих разделах учебника. Они сопровождаются предварительной и последующей механической обработкой, влияние которой следует учитывать при оценке физико-механических свойств восстановленных поверхностей и ресурса детали в целом.

Способ ремонтных размеров разрабатывают и применяют в основном для простых сборочных единиц – соединений двух гладких цилиндрических деталей. Особенность способа состоит в том, что восстанавливают посадку путем механической обработки наиболее сложной и ответственной детали под ремонтный размер и замены сопряженной с ней детали новой или восстановленной также до ремонтного размера, тем самым обеспечивая требуемый зазор между деталями.

Таким образом, для цилиндрических соединений *ремонтный размер* – это размер восстановленной детали (например, вала), который обеспечивает в сопряжении с другой деталью (отверстием) заданную посадку. Механической обработкой под ремонтный размер восстанавливают геометрическую форму, требуемую шероховатость и необходимую размерную точность изношенных поверхностей деталей. Этот способ широко используют при ремонте автотранспортных средств и различных транспортно-технологических машин при больших объемах работ.

Для создания необходимого количества запасных частей с учетом потребностей ремонтного производства, а также для его технологической оснастки разрабатывают системы ремонтных размеров. При этом различают стандартные, регламентированные и свободные ремонтные размеры. В рамках отрасли разрабатывают отраслевые стандарты на системы ремонтных размеров, которые используют при изготовлении запасных частей, т.е. тех деталей, которые подлежат замене. Соответственно, заводы-изготовители и ремонтные предприятия при восстановлении узлов машин используют системы стандартных ремонтных размеров. В рамках отдельного предприятия или объединения разрабатывают технические условия на системы регламентированных ремонтных размеров деталей, которые используют для восстановления соединений только на данном предприятии. Применение стандартных и регламентированных ремонтных размеров позволяет осуществлять ремонт, имея готовые для замены детали и используя при сборке принципы неполной или групповой взаимозаменяемости. При отсутствии регламентирующей документации используют систему свободных ремонтных размеров (в ремонтном производстве при небольших объемах работ). Она предусматривает механическую обработку сложной детали узла и подгонку по месту новой (менее сложной) детали до размера отремонтированной детали. В этом случае предварительно подготовить новые детали с окончательными размерами практически невозможно.

В системах стандартных и регламентированных ремонтных размеров восстанавливаемая деталь, которая подвергается механической обработке, может иметь несколько ремонтных размеров (1, 2, 3-й и т. д.). Ее обработку ведут до тех пор, пока не будет достигнут последний ремонтный размер детали. При этом соединение деталей будет иметь соответствующее число ремонтных размеров при заданной величине посадки.

Ремонтные размеры детали, а также их количество рассчитывают на основе величин ремонтного интервала и предельной толщины слоя металла, который может быть снят с детали при сохранении ее работоспособности.

Ремонтный интервал (γ) – это величина уменьшения тела детали в результате изнашивания и механической обработки. Обработку выполняют для восстановления ее геометрической формы и положения в пространстве, а также обеспечения необходимой шероховатости поверхности.

Для вала (рисунок 9.1, а) ремонтный интервал можно определить по формуле

$$\gamma = d_n - d_{p1} = 2(\delta' + \delta''), \quad (9.1)$$

где d_n – номинальный размер вала, мм;

d_{p1} – размер после обработки (первый ремонтный размер), мм;

δ' – толщина слоя, снятого в результате обработки, мм;

δ'' – толщина изношенного слоя, мм.

Максимальная толщина слоя, который можно снять (в процессе изнашивания и обработки), определяется условиями прочности или износостойкости вала (если поверхность упрочнена на ограниченную глубину). Для валов в большинстве случаев допускают уменьшение диаметра шейки до 5 % от их номинального размера (исходя из условия прочности). Дальнейшее уменьшение диаметра шейки разрешают только при наличии расчета, доказывающего возможность намечаемого уменьшения.

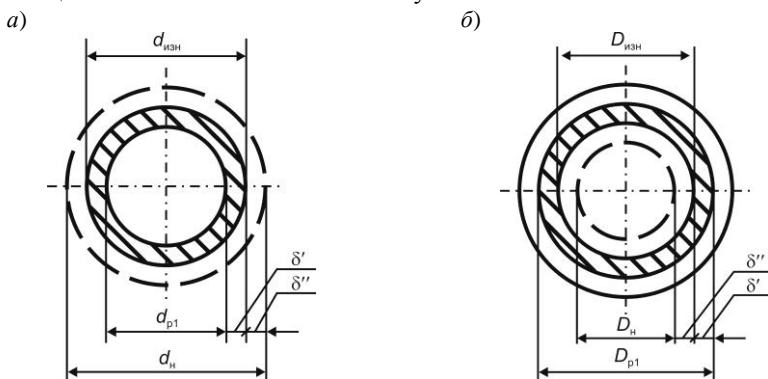


Рисунок 9.1 – Схемы к определению ремонтного интервала:
а – для вала; б – для отверстия

Количество ремонтных размеров зависит от величины износа детали и припуска на ее механическую обработку. Припуск на обработку, т. е. слой металла, который удаляют с поверхности детали, должен устранить последствия износа детали и обеспечить ей заданную геометрическую форму, а также необходимые параметры шероховатости.

Первый ремонтный размер (см. рисунок 9.1) для вала d_{p1} и отверстия D_{p1} можно определить по следующим формулам:

– для валов –

$$d_{p1} = d_n - 2(\delta' + \delta'');$$

– для отверстий –

$$D_{p1} = D_n + 2(\delta' + \delta''),$$

где D_n – номинальный диаметр отверстия, мм.

Толщину слоя металла, снятого в процессе обработки δ' , т. е. припуск при обработке вала под ремонтный размер, определяют из выражения

$$\delta' = R_z + T + y + E,$$

где R_z – высота микронеровностей изношенной поверхности, мм;

T – толщина дефектного слоя поверхности, мм;

y – величина прогиба вала, мм;

E – величина эксцентриситета, обусловленная неточностью базирования вала при обработке на станке, мм.

Как правило, величина припуска на сторону при чистовой обточке и расточке составляет 0,05–0,10 мм, а при шлифовании – 0,03–0,05 мм.

Способ ремонтных размеров является достаточно простым, надежным и позволяет сохранить принцип взаимозаменяемости деталей в пределах ремонтного размера. Этот способ имеет широкомасштабное применение для таких ответственных деталей автотранспортных средств и машин, как блоки и гильзы цилиндров двигателей, коленчатые и распределительные валы и др.

Вполне очевидно снижение ресурса восстановленных сопряжений по сравнению с новыми, поскольку в результате механической обработки под ремонтный размер ухудшаются условия взаимодействия деталей (увеличиваются динамические нагрузки, изменяются скорости относительного перемещения и инерционные силы), а также уменьшается твердость и, как следствие, износостойкость материала детали. В качестве примера приведены данные (таблица 9.1) по работоспособности двигателя внутреннего сгорания после восстановления под ремонтный размер шеек коленчатого вала (двигателя ЗИЛ-130). Видно, что уменьшение твердости шеек ведет к существенному снижению ресурса работы двигателя внутреннего сгорания (таблица 9.2). Поэтому для обеспечения работоспособности отремонтированного агрегата (хотя бы на 50 % от ресурса нового агрегата) необходимо проведение дополнительной термообработки восстановленных деталей.

Таблица 9.1 – Твердость шеек коленчатого вала двигателя, перешлифованных под ремонтные размеры

Место замера	Твердость HRC после перешлифовки под ремонтный размер				
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Коренные шейки	55	53	51	38	35
Шатунные »	53	52	49	35	34

Таблица 9.2 – Ресурс работы (10^3 км) двигателя после восстановления

После замены вкладышей на эксплуатационные	До первого капитального ремонта	После восстановления коленчатого вала под ремонтные размеры				
		1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
75–95	164	84,4	78,0	73,3	71,3	52,0
Отношение послеремонтного ресурса к доремонтному, %						
–	100	51,4	47,5	44,7	43,4	31,7

Количество ремонтных размеров определяют по следующим формулам:

1) для охватывающей детали (отверстия) –

$$n = \frac{D_{\max} - D_n}{\gamma}; \quad (9.2)$$

2) для охватываемой детали (вала) –

$$n = \frac{d_n - d_{\min}}{\gamma}, \quad (9.3)$$

где D_{\max} , d_{\min} – предельно допустимые размеры соответственно охватывающей и охватываемой деталей, мм.

Способ постановки дополнительной ремонтной детали имеет меньшее распространение и используется в единичном ремонтном производстве. Особенность способа состоит в том, что в сопряжение для компенсации износа вводят дополнительную деталь (компенсатор износа). Этот способ применяют в ремонтном производстве для восстановления посадочных поверхностей под подшипники качения на валах, в корпусных деталях (картерах коробок передач, задних мостах и др.) и в ступицах колес, а также для ремонта отверстий с изношенной резьбой и др.

На рисунке 9.2 приведено несколько примеров постановки компенсатора износа в виде гильзы, втулки и резьбового вкладыша (ввертыша).

Дополнительные ремонтные детали применяют при восстановлении изношенных деталей как под ремонтные, так и под номинальные размеры. Дополнительную (специально изготовленную) деталь устанавливают на изношенную и предварительно обработанную поверхность детали. Надежность ее соединения с основной деталью достигается за счет посадки с гарантированным натягом, сваркой или склеиванием, с помощью стопорных

винтов, штифтов или шпилек. После постановки и закрепления ремонтной детали осуществляют ее окончательную механическую обработку до требуемых размеров.

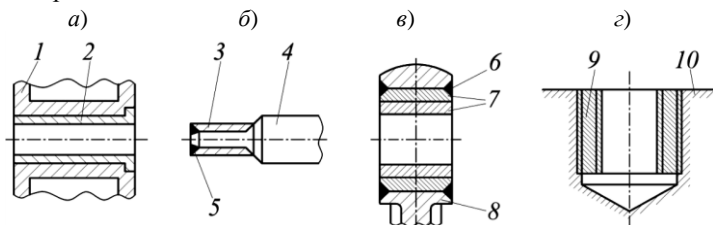


Рисунок 9.2 – Схемы постановки дополнительной ремонтной детали:
а – в цилиндре; *б* – на шейке вала; *в* – в верхней головке шатуна; *г* – в резьбовом соединении; 1 – цилиндр; 2 – гильза; 3, 7 – втулки; 4 – вал; 5, 6 – сварочные швы; 8 – верхняя головка шатуна; 9 – резьбовой вкладыш; 10 – деталь

Ремонтную деталь изготавливают в виде гильзы, втулки, резьбового вкладыша и т. д. Сборку ремонтной и восстанавливаемой деталей осуществляют, как правило, под прессом. При этом следует учитывать изменение размеров ремонтной дополнительной детали: например, при напрессовке втулки на вал увеличивается ее наружный диаметр, а при запрессовке гильзы в отверстие уменьшается ее внутренний диаметр.

Дополнительные ремонтные детали изготавливают из того же материала, что и восстанавливаемая деталь. При этом износостойкость и прочностные свойства рабочей поверхности ремонтной детали должны быть не ниже соответствующих характеристик восстанавливаемой поверхности детали.

Для повышения прочности соединения дополнительной детали с восстанавливаемой, а также при больших натягах сборку производят с нагревом охватывающей или с охлаждением охватываемой детали. Температуру нагрева (или охлаждения) определяют по формуле

$$T = 10^{-3} \kappa \frac{\Delta + S}{\alpha d},$$

где κ – коэффициент, учитывающий изменение температуры детали в процессе сборки, $\kappa = 1,15 \dots 1,30$;

Δ – максимальный расчетный натяг, мкм;

S – гарантированный зазор, мкм;

α – коэффициент линейного термического расширения материала дополнительной детали;

d – диаметр сопряжения, мм.

Примером применения компенсатора износа может служить технологический процесс восстановления изношенной поверхности шейки вала (см. рисунок 9.2, б), который состоит из следующих операций:

- 1) механической обработки изношенной поверхности вала по седьмому качеству точности с шероховатостью $R_a = 1,25 \dots 0,32$ мкм;
- 2) напрессовки на вал ремонтной втулки;
- 3) фиксации втулки сваркой;
- 4) контроля качества соединения втулки и вала;
- 5) механической обработки ремонтной втулки с требуемой точностью.

Достоинством способа является простота технологии восстановления и применяемого оборудования. Однако он имеет ограниченное применение и только в рамках отдельного ремонтного предприятия из-за необходимости учета индивидуальных особенностей каждой детали (реальной степени изнашивания, формы детали и конструкций сборочной единицы, условий эксплуатации и других факторов). Поскольку данный способ используется в основном при наличии увеличенного износа рабочих поверхностей, ресурс восстановленной детали будет значительно ниже, чем новой.

Способ замены рабочей части детали используют в единичном ремонтном производстве для восстановления корпусных и сложных узлов машин (блоков шестерен коробки передач и др.). По этому способу изношенную часть отделяют от детали, а на ее месте закрепляют заготовку, из которой механической обработкой изготавливают заменяемую рабочую часть ремонтируемой детали. Заготовку соединяют с восстанавливаемой деталью напрессовкой, сваркой или склеиванием.

В качестве примера на рисунке 9.3 представлена схема восстановления блока зубчатых колес 1, в котором зубчатый венец 2 заменен новым. Для этого изношенный венец срезают, затем напрессовывают заготовку, дополнительно фиксируя ее сварочным швом 3, после чего нарезают новые зубья. Для упрочнения восстановленной детали ее подвергают закалке, как правило, ТВЧ.

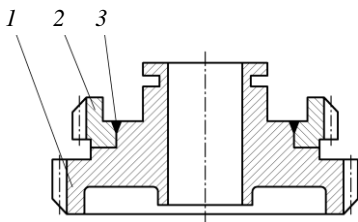


Рисунок 9.3 – Схема восстановления блока шестерен заменой неисправного зубчатого венца:

1 – основная часть блока; 2 – замененный венец; 3 – сварочный шов

Способ применяют также для восстановления корпусных деталей (кузовов и кабин машин, крышек коробок передач и раздаточных редукторов и др.).

При всей технологической и технической сложности способа ремонт ответственной крупной детали обходится значительно дешевле, чем покупка или изготовление новой.

Между тем наиболее эффективным, но и дорогостоящим является способ ремонта посадок восстановлением первоначальных (номинальных) размеров сопрягаемых деталей. Используя известные методы наращивания слоев металла на изношенные поверхности, можно не только сохранить, но и увеличить межремонтный ресурс сопряжений.

Контрольные вопросы к разделу 9

- 1 Как нарушение посадок влияет на работоспособность подвижных и неподвижных соединений?
- 2 Классифицируйте основные способы восстановления посадок и опишите их особенности.
- 3 Приведите формулы для расчета количества ремонтных размеров для охватываемой и охватывающей деталей.
- 4 Что такое ремонтный интервал?
- 5 Из каких операций состоит технологический процесс восстановления изношенной поверхности шейки вала?
- 6 В каких сопряжениях используют компенсаторы износа?
- 7 Нарисуйте схемы постановки компенсатора износа в виде гильзы, втулки и резьбового вкладыша.
- 8 Какие детали выгодно восстанавливать путем замены рабочей части?

10

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ МАТЕРИАЛА

Как уже отмечалось, ремонтируемая деталь является удобной заготовкой, поскольку не требует новых материальных и трудовых затрат. Ее размеры в максимальной степени соответствуют окончательным размерам, поэтому восстановление связано с минимальным объемом механической обработки. При этом количество повреждений поверхностей, как правило, невелико, а восстановительные работы имеют относительно небольшой объем. Поэтому стоимость отремонтированных деталей даже в условиях несовершенного ремонтного производства оказывается значительно ниже, чем стоимость новых. Применение эффективных методов упрочнения при ремонте позволяет во многих случаях повысить ресурс детали даже в сравнении с ресурсом новой детали.

Восстановление пластическим деформированием состоит в перераспределении материала детали с нерабочей на изношенную поверхность в результате приложения внешней нагрузки. Этому перераспределению сопутствует необратимое изменение формы и размеров детали без изменения ее массы и без нарушения ее сплошности.

Метод используют для восстановления деталей из металлов и сплавов, обладающих достаточно высоким уровнем деформационной способности. В зависимости от свойств материала пластическому деформированию могут подвергаться детали как в холодном, так и в горячем состоянии (при нагреве до температур около 400 °С).

Процесс восстановления детали состоит из трех стадий: а) подготовка детали; б) собственно деформирование; в) завершающая обработка (механическая и термическая).

Характер завершающей обработки детали в основном зависит от способа ее пластического деформирования, назначения и условий эксплуатации.

Подготовку проводят для повышения пластичности материала детали и, как следствие, для повышения эффективности ее восстановления. Как правило, она включает предварительную термообработку (отжиг или высокий отпуск) детали перед холодным деформированием или ее нагрев до заданной температуры перед горячим деформированием.

Нагрев детали, температура которого зависит от материала и конфигурации детали, характера и места износа, используют для снижения усилий деформирования. Как правило, в нагретом состоянии восстанавливают детали из средне- и высокоуглеродистых сталей. Детали из низкоуглеродистых сталей, имеющих твердость до 30 HRC, а также из цветных металлов и сплавов, как правило, деформируют без предварительной термообработки (т.е. из материалов, имеющих достаточно высокую деформационную способность).

Пластическое деформирование металла сопровождается повышением его прочности и твердости при снижении деформационной способности.

Пластическое деформирование применяют для решения следующих задач: во-первых, для повышения физико-механических свойств материалов деталей; во-вторых, для восстановления формы и размеров деталей.

Восстановление физико-механических свойств поверхностных слоев деталей, в том числе износостойкости и усталостной прочности осуществляют методами *поверхностного пластического деформирования* (*обкаткой шариками и роликами, алмазным выглаживанием, дробеструйной обработкой* и др.), информация о которых представлена в разд. 5. Естественно, при этом учитываются особенности пластического деформирования при восстановлении изношенных деталей.

Восстановление первоначальных размеров изношенных деталей осуществляют в процессе перераспределения металла с нерабочих поверхностей детали на изношенные поверхности. Для этих целей используют *осадку, выдавливание, раздачу, обжатие* и др.

Восстановление первоначальной формы деталей, измененной при их эксплуатации в условиях изгиба и кручения, производят *правкой* статическим нагружением или наклепом, реализуя упругие свойства материала детали.

На рисунке 10.1 представлены принципиальные схемы восстановления деталей и конструкций перечисленными методами.

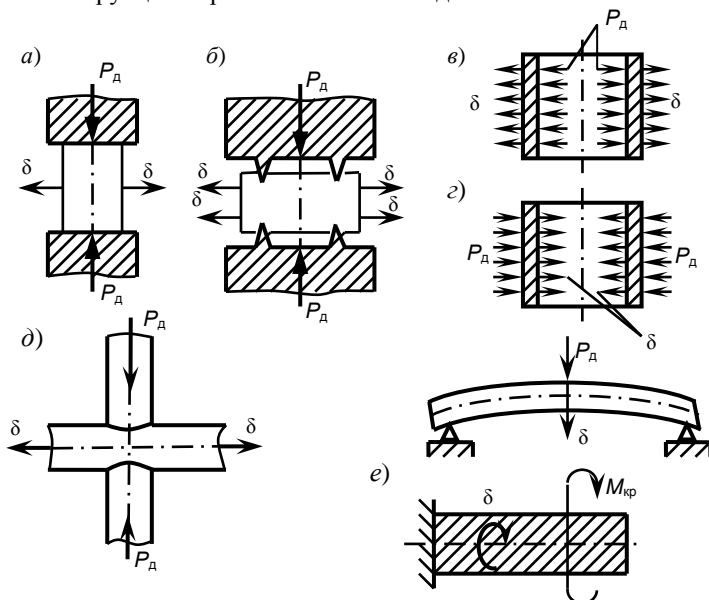


Рисунок 10.1 – Принципиальные схемы восстановления деталей пластическим деформированием:
a – осадка; *б* – выдавливание; *в* – раздача; *г* – обжатие; *д* – вытяжка; *е* – правка
 (P_d – внешняя сила, δ – деформация)

Восстановление осадкой используют для увеличения наружного и уменьшения внутренних диаметров деталей типа втулок, а также увеличения наружного диаметра монолитных деталей за счет уменьшения их длины (см. рисунок 10.1, а). Этим методом восстанавливают также шейки валов, толкатели клапанов и др.

При осадке деталь деформируют в направлении, перпендикулярном усилию. Осадкой восстанавливают бронзовые втулки с износом по наружному и внутреннему диаметрам. При деформировании в холодном состоянии их высоту можно уменьшить до 15 %. Для сохранения отверстий во втулке их при осадке заполняют вставками. Диаметр вставки должен быть меньше, чем отверстия втулки (с учетом припуска на обработку). Осадку проводят в специальных приспособлениях с помощью винтовых или гидравлических прессов.

На рисунке 10.2 приведена схема приспособления для осадки втулки при восстановлении внутреннего диаметра втулок. Оно содержит опорную плиту, пуансон 1, оправку 2 и вспомогательную втулку 4.

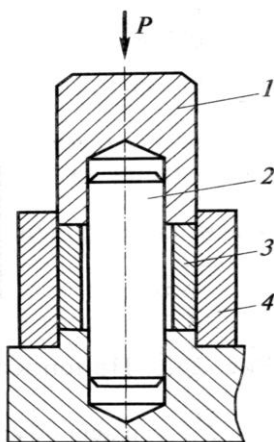


Рисунок 10.2 – Приспособление для осадки втулок:

- 1 – пуансон; 2 – оправка;
- 3 – восстанавливаемая втулка;
- 4 – втулка

При помощи пуансона 1 происходит деформирование втулки 3 по внутреннему диаметру до размеров оправки 2 при сохранении наружного диаметра за счет удерживающей втулки 4.

Восстановление выдавливанием применяют для увеличения наружных размеров деталей за счет выдавливания металла из нерабочей зоны (см. рисунок 10.1, б).

При восстановлении детали **выдавливанием** направления усилия и деформации также перпендикулярны, но преобладает местная деформация детали и ее общие размеры не меняются столь значительно, как при осадке. Выдавливанием восстанавливают изношенные боковые поверхности шлицев на валах, зубья шестерен и др. Восстановление стальных деталей проводят с нагревом и без него на прессах и штампах,

сконструированных для конкретных групп деталей.

На рисунке 10.3 представлена схема приспособления для восстановления зубьев зубчатых колес. Оно содержит пуансон 4 и матрицу 7, повторяющие форму зубьев, центрирующую разрезную втулку 3, выталкиватель 1 и ограничительное кольцо 5, обеспечивающее сохранение формы наружной поверхности шестерни. Деталь устанавливают с помощью оправки 2 и втулки 3 в матрице 7 и под действием пуансона 4 выдавливают нужный профиль детали.

Восстановление раздачи (см. рисунок 10.1, в) применяют для увеличения внутреннего диаметра полых цилиндрических деталей (втулок, пальцев и др.) без изменения высоты.

Как видно из рисунка 10.1, в, для этого используют радиально направленные усилия, совпадающие с направлением деформирования детали. Эффективность этого способа зависит от пластичности материала втулки, температуры нагрева и размеров детали, в том числе диаметра втулки, а также условий взаимного перемещения втулки и пуансона, обеспечивающего раздачу.

Увеличение диаметра зависит от упругих характеристик металла, температуры предварительного нагрева и диаметра пуансона. Раздачу осуществляют двумя способами:

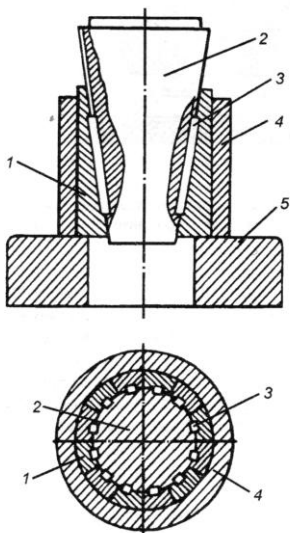


Рисунок 10.4 – Приспособление для раздачи втулок:
1 – клин-сектор; 2 – пуансон;
3 – направляющая шпонка;
4 – восстанавливаемая втулка;
5 – опорная плита

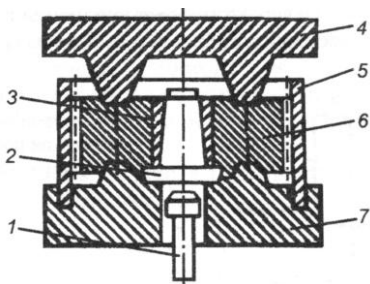


Рисунок 10.3 – Приспособление для выдавливания в штамп:
1 – выталкиватель; 2 – оправка; 3 – центрирующая втулка; 4 – пуансон;
5 – кольцо; 6 – восстанавливаемая шестерня; 7 – матрица

1) продавливанием пуансона путем его перемещения вдоль оси детали;

2) перемещением в радиальном направлении с помощью специального приспособления (штампа) клиньев-секторов (не более 12 штук), которые размещают между пуансоном и деталью и растягивают под давлением втулку до заданных размеров.

На рисунке 10.4 показана схема приспособления для восстановления втулок. Оно включает опорную плиту 5, на которую устанавливают втулку 4, конический пуансон 2 (угол при вершине конуса составляет 8–10°), направляющую шпонку 3 и набор клиньев 1. Пуансон 2 перемещается вниз и при помощи клиньев-секторов 1 раздвигает втулку 4 в радиальном направлении до заданных размеров. Количество секторов обычно составляет 12 единиц.

Раздачу проводят также под постоянный размер продавливанием шарика или пуансона или под любой размер – развальцовкой отверстия.

Обжатие применяют при решении задачи, обратной раздаче, для восстановления внутреннего диаметра полых деталей (втулок, колец и др.) с изношенным отверстием за счет уменьшения наружного диаметра по направлению действия сжимающего усилия (см. рисунок 10.1, з). Восстановление стальных деталей производят в холодном или нагретом (до температур 800–950 °С) состоянии под прессом в специальном приспособлении путем проталкивания детали через матрицу меньшего диаметра.

Приспособление (рисунок 10.5) для обжатия стальных втулок содержит оправку 4, матрицу 2, конфигурация отверстия которой (входное отверстие, сужающееся под углом 7–8°, калибрующая часть и выходное расширяющееся отверстие) обеспечивает снижение усилий проталкивания втулки, и опорное кольцо 1, сохраняющее длину втулки. Восстанавливаемую втулку 3 продавливают оправкой 4 через матрицу 2. Калибровка позволяет уменьшить внутренний диаметр детали на величину износа с учетом припуска на развертывание до требуемого размера. Обжатием восстанавливают втулки, зубчатые муфты с внутренними изношенными зубьями, звенья гусениц, проушины рычагов, шатунов, вилок и др.

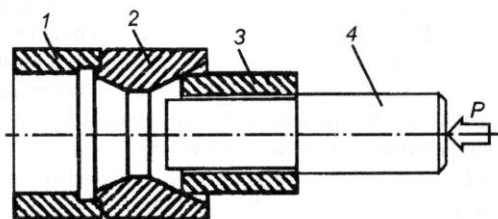


Рисунок 10.5 – Приспособление для обжатия втулок:
1 – опорное кольцо; 2 – матрица;
3 – восстанавливаемая втулка;
4 – оправка

Вытяжку (см. рисунок 10.1, д) применяют для увеличения длины детали путем местного обжатия и уменьшения ее поперечного сечения, а также для удлинения стержневых элементов (тяг) на небольшую длину. Как правило, восстановление производят в холодном состоянии.

Накатку (рисунок 10.6) используют для восстановления наружных цилиндрических поверхностей за счет компенсации износа рабочих поверхностей выдавливанием металла из восстанавливаемой поверхности. Ее осуществляют зубчатыми роликами с шагом зубьев 1,5–1,8 мм, что обеспечивает снижение площади опорной поверхности не более 50 %. Если твердость материала восстанавливаемой детали превышает HRC 30, деталь

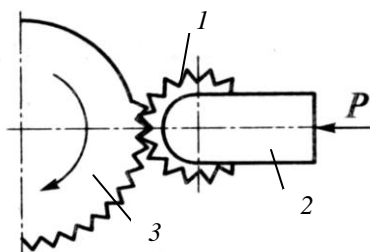


Рисунок 10.6 – Схема восстановления накаткой:
1 – накатный ролик; 2 – приспособление (держатель); 3 – восстанавливаемая деталь

предварительно подвергают отпуску, если же твердость меньше HRC 30, восстановление производят без отпуска.

Восстановление правкой обеспечивает исправление искривленных, скрученных и покоробленных деталей. Правкой восстанавливают валы, шатуны, рычаги, вилки, кронштейны, элементы металлоконструкций.

Правку осуществляют следующими методами: механическим, термомеханическим и термическим.

В свою очередь механическую правку (без нагрева) производят статическим и динамическим способами.

При механической статической правке применяют статическую нагрузку к деформированной детали в месте наибольшего искривления (см. рисунок 10.1, е). В холодном состоянии правят валы диаметром до 200 мм, если прогиб не превышает 1 мм на 1 м длины вала, с помощью винтового или гидравлического пресса. Усилие правки рассчитывают с учетом предела текучести материала вала, диаметра его сечения и расстояния между опорами. Правка без нагрева снижает усталостную прочность на 15–40 %, поэтому для повышения качества правки деталь выдерживают под прессом в течение длительного времени или проводят дополнительную термообработку детали для стабилизации правки, снятия остаточных напряжений и улучшения физико-механических свойств материала. Правку выполняют на прессах, в специальных приспособлениях и вручную.

При механической динамической правке (наклепом) осуществляют динамическое воздействие (пневматическим молотком или другим инструментом) на нерабочие поверхности восстанавливаемой детали (рисунок 10.7). Эти поверхности деформируют до такой степени, чтобы обеспечить деформацию и восстановление рабочих поверхностей детали.

Правку с нагревом (термомеханический способ) используют для деталей со значительными деформациями, например, для валов с прогибом более 8 мм на 1 м длины. Для этого равномерно прогревают детали по всему деформированному сечению. Для стальных деталей нагрев производят до температуры отжига (750–800 °С) с помощью газовых горелок. Затем осуществляют механическое воздействие, как и при механической правке, с последующей обязательной термообработкой.

Правку с местным нагревом (термический способ) производят для массивных длинномерных изделий (балок, стрел и др.). Для этого

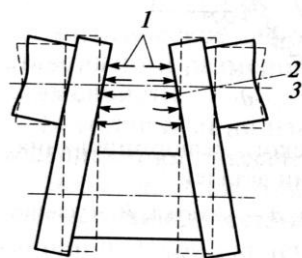


Рисунок 10.7 – Схема правки коленчатого вала чеканкой:
1 – место наклепа; 2 – состояние до правки; 3 – состояние после правки

стальную деталь подвергают быстрому локальному нагреву (до температур 800–900 °С) в месте наибольшего прогиба с выпуклой стороны. Эффективность этого способа правки повышают закреплением концов детали.

Термоупругопластическое деформирование (ТПД) занимает особое место при восстановлении деталей типа «полый цилиндр» (поршневых пальцев и гильз цилиндров двигателей). Его основное достоинство состоит в том, что для восстановления номинальных размеров детали (по диаметру как внешней, так и внутренней поверхности) не требуется прессового оборудования или установок для наращивания слоя металла. ТПД обеспечивает перераспределение металла с нерабочих на изношенные рабочие поверхности детали за счет пластического деформирования, возникающего при нагреве детали за счет перепада температур этих поверхностей. Изношенную поверхность нагревают до более высокой температуры, чем нерабочую, в результате чего деталь расширяется в сторону изношенной поверхности, сохраняя свои размеры на нерабочей поверхности.

Восстановление полый детали с изношенной внутренней поверхностью происходит в результате пластической деформации, возникающей при нагреве внутренней поверхности детали и охлаждении ее наружной поверхности. При нагреве полый детали изнутри ее внутренний диаметр уменьшается, а охлаждение наружной поверхности препятствует расширению детали в радиальном направлении от ее оси. В результате такой термообработки сохраняется уменьшенный внутренний диаметр детали, т.е. происходит перераспределение металла на изношенную поверхность.

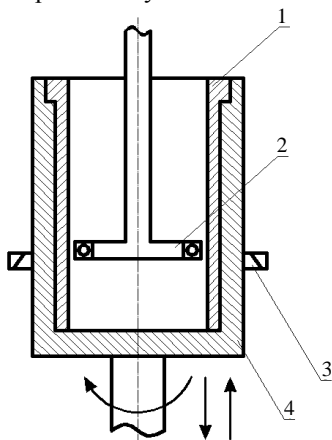


Рисунок 10.8 – Схема восстановления внутренней поверхности втулки в жесткой матрице:

- 1 – восстанавливаемая деталь;
- 2 – индуктор;
- 3 – устройство для охлаждения матрицы;
- 4 – матрица

На рисунке 10.8 представлена принципиальная схема восстановления внутренней изношенной поверхности втулки с помощью жесткой матрицы. Приспособление содержит матрицу 4, повторяющую форму детали и имеющую возможность вращения и возвратно-поступательного движения, индуктор 2 для нагрева ТВЧ, а также устройство 3 для охлаждения матрицы водяным душем (спрейер). Неподвижный индуктор 2 занимает в матрице 4 крайнее нижнее положение и равномерно нагревает внутреннюю поверхность детали 1 (до температуры 730–750 °С) при ее перемещении вниз и вращении вместе с матрицей. Затем деталь с внешней нерабочей стороны охлаждают до температуры 400–550 °С (за счет ее взаимодействия с матри-

цей, охлаждаемой спрейером 3). В результате происходит радиальная усадка материала и уменьшение внутреннего диаметра детали, т.е. наращивание рабочей поверхности. За один такой цикл термовоздействия, включающий нагрев и охлаждение, усадка детали достигает 1,5–2,0 %.

После ТПД выполняют необходимую механическую обработку поверхностей детали. Отметим, что стоимость восстановления деталей методом ТПД не превышает 60 % стоимости новых деталей.

Контрольные вопросы к разделу 10

1 Какие задачи решают путем пластического деформирования рабочих поверхностей деталей?

2 Изобразите принципиальные схемы восстановления деталей осадкой, выдавливанием, раздачей, обжатием и вытяжкой.

3 Дайте краткую характеристику основных методов восстановления деталей за счет пластической деформации.

4 В каких случаях используют механическую, термомеханическую и термическую правку и в чем состоят их технологические особенности?

При производстве, техническом обслуживании и ремонте машин широко применяют различные виды синтетических материалов (полимеров, а также композиционных материалов и пластических масс на их основе). Современные синтетические материалы (СМ) используют для восстановления целостности деталей, ремонта рамных конструкций и соединений, восстановления посадок и взаимного расположения поверхностей, а также восстановления изношенных поверхностей.

При выборе СМ и способа восстановления детали или узла машины следует учитывать свойства СМ, прежде всего, относительно невысокие прочность и теплостойкость наиболее распространенных и доступных СМ, а также возможные условия их эксплуатации (нагрузки, скорости, температурный режим и др.).

СМ разделяют по назначению на клеи, герметики и материалы для покрытий. Следует отметить, что композиционные материалы триботехнического назначения на основе полимеров для восстановления деталей, как правило, не используются.

11.1 Восстановление клеевыми материалами и композициями

Клеями называют композиционные материалы, способные соединять поверхности твердых материалов благодаря образованию между соединяемыми поверхностями и клеевой прослойкой прочных адгезионных связей. В состав клеевой композиции входят отвердители и различные добавки (наполнители, растворители, стабилизаторы, пластификаторы и др.). Добавки обеспечивают необходимую липкость клея, исходную вязкость, скорость отверждения и жизнеспособность, а также эксплуатационные характеристики клеевой прослойки (прочность, жесткость, термо- и атмосферостойкость и др.).

Клеи изготавливают, как правило, на основе синтетических мономеров, олигомеров, полимеров и их смесей. Их разделяют на термореактивные и термопластичные клеи.

У терморезактивных клеев в процессе склеивания изменяется химическая структура. При этом они из пластичного состояния необратимо переходят в стеклообразное (жесткое) или эластичное в результате протекающего процесса отверждения (химической реакции поликонденсации или полимеризации).

У термопластичных клеев в процессе склеивания химическая структура не изменяется. Они затвердевают в результате удаления растворителя или застывания расплава, но при нагреве могут вновь приобрести пластичное состояние.

Наибольшее применение имеют клеи на эпоксидной, акриловой, полиуретановой и фенолформальдегидной основе, а также на основе фенольных смол и кремнийорганических соединений, обеспечивающих высокую термостойкость клеевых соединений.

Клеевые технологии восстановления деталей обеспечивают возможность устранения таких дефектов, как трещины размером до 150 мм, пробоины площадью до 2,5 см², течи, сколы, кавитационные разрушения. С помощью клеевых соединений можно ремонтировать рамные конструкции, создавать износостойкие графитовые покрытия, восстанавливать изношенные плоские и цилиндрические посадочные поверхности деталей и т. д.

Наибольшее распространение при восстановлении деталей получили *эпоксидные клеевые материалы*. Высокая прочность соединения эпоксидных смол с различными материалами, устойчивость к атмосферным и коррозионным воздействиям, химическая пассивность по отношению к склеиваемым материалам и малая усадка обеспечивают широкие возможности их применения.

Армирование эпоксидных материалов стеклотканями существенно расширяет область их применения. С помощью армированных эпоксидных материалов можно устранять пробоины площадью до 50 см² и заделывать трещины большой длины, что повышает эффективность ремонта кабин, баков, облицовки и других корпусных деталей.

Эпоксидные материалы применяют при ремонте деталей, работающих в диапазоне температур от -70 до +120 °С. Их основным недостатком является исходная токсичность компонентов.

Помимо эпоксидных смол, при ремонте машин применяют *акриловые* (таблица 11.1), *цианакриловые* (таблица 11.2) и *силиконовые* клеи.

Из клеевых материалов зарубежного производства большими возможностями для восстановления деталей машин обладают:

MOLYKOTE AP – универсальный силиконовый клей-герметик, обеспечивающий прочное соединение деталей в рабочем диапазоне температур -50...+220 °С;

Silicon AP 1945548 – кремнийорганический белый силиконовый каучук;

Silicon AP 1945505 – кремнийорганический прозрачный силиконовый каучук;

Silicon AP 2404559 – кремнийорганический силиконовый каучук черного цвета.

Перечисленные материалы, производимые фирмой MOLYKOTE, применяются для склеивания деталей из металлов, стекла, резины, натуральных и синтетических волокон, большинства видов пластмасс.

Таблица 11.1 – Акриловые клеи

Параметр	АН-103	АН-111	АН-105АБ	АН-106АБ	АН-110АБ	КВ-401
Время схватывания	15–20 мин	5–10 мин	2–3 мин	2–3 мин	15 – 90 с	10–20 с
Прочность, МПа	30	30	30	35	30	5
Температура эксплуатации, °С	–60...+120	–60...+150	–60...+150	–60...+175	–60...+175	–60...+175

Таблица 11.2 – Цианакриловые клеи

Параметр	ТК-200	ТК-201	ТК-300	КМ-200	МИГ
Время схватывания	15–20 мин	5–10 мин	2–3 мин	2–3 мин	15–90 с
Температура эксплуатации, °С	–60...+120	–60...+150	–60...+150	–60...+175	–60...+175

Клеевые материалы не только обеспечивают возможность прочного соединения деталей из различных материалов, но устраняют зазоры и трещины. Их применяют для изготовления уплотнений и прокладок любой формы.

Восстановление деталей и узлов машин с помощью ремонтных полимерных композитов (РПК) принято называть *холодной молекулярной сваркой* (ХМС). Будем также придерживаться общепринятого (по существу сугубо рекламного) названия обыкновенных композитов на основе термореактивных полимеров холодного отверждения.

Клеевой шов формируется с помощью специально разработанных композиционных материалов («реком», «пластметалл» и др.), которые в исходном состоянии имеют пастообразную или жидкую консистенцию.

РПК представляют собой металлизированные композиции, состоящие на 70–80 % из порошков металлов (никель, хром, цинк и др.) и олигомерных связующих, образующих при отверждении трехмерную структуру. Они легко поддаются механической обработке, их свойства приведены в таблицах 11.3 и 11.4.

Эти ремонтные материалы, как правило, состоят из двух упаковок, в одной из которых основным компонентом является олигомер или полимер, а в другой – отвердитель или сшивающий компонент. После соединения этих компонентов формируется шитая структура термореактивного типа, обеспечивающая комплекс эксплуатационных свойств ремонтным материалам.

Таблица 11.3 – Физико-механические и технологические характеристики ремонтных материалов

Параметр	«Универсал»	«Керамик-т»	«Унирем»	«Реком-Б»
Плотность, кг/м ³	2200	1600	–	2140
Время отверждения (схватывания), мин:				
при 20 °С	50	–	3–4 ч	30
при 150 °С	10	40	–	5
Прочность, МПа:				
при сжатии	52	56	90–110	100
изгибе	–	–	–	70
сдвиге	14	20	–	20
растяжении	–	–	–	45
Твердость по Бринеллю, МПа	1,4	1,8	100–150	10–12
Рабочая температура, °С	–70...+200	–50...+180	–200...+150	–70...+150
Коэффициент трения в масле	–	–	–	0,06

Таблица 11.4 – Физико-механические и технологические характеристики полимерных материалов

Параметр	Сталь-керамика	Керамика	Сталь	Алюминий	Феррохром	Антифрикционный
Плотность, кг/м ³	2700	2500	2550	1850	2500	2000
Рабочая температура, °С	–120...+120			–120...+200	–120...+120	
Температуростойкость, °С (по Вику)	300	300	300	300	300	300
Время отверждения (при 20 °С), ч	3,0–3,5 (полная прочность – за 24 часа)					
Твердость по Бринеллю, МПа	1,7	1,7	1,7	1,6	2,0	1,5
Прочность, МПа:						
при сжатии	195	180	185	160	230	145
растяжении	82	80	81	75	81	61
изгибе	78	71	76	69	76	60
нормальном отрыве от стали	48	44	45	42	45	41

ХМС не требует термического воздействия на восстанавливаемую поверхность и проводится на воздухе без какой-либо защитной среды и спе-

циального технологического оборудования, что позволяет выполнять ремонтно-восстановительные работы в любых помещениях, а также в полевых условиях. Компоненты ХМС в процессе отверждения практически не выделяют летучих токсичных веществ, что обеспечивает экологическую безопасность их применения при ремонте машин.

ХМС обеспечивает довольно высокую прочность соединения деталей из различных материалов, позволяет восстанавливать размеры и форму валов, отверстий, опорно-направляющих дорожек, шлицев, посадочных мест под подшипники, а также наносить на рабочие поверхности деталей износостойкие покрытия, устранять трещины и сколы.

Детали, изготовленные или восстановленные методом ХМС, сохраняют работоспособность при температурах от -60 до $+350$ °С в зависимости от свойств исходных компонентов РПК.

Наиболее распространенным объектом ремонта являются резьбовые соединения. Особенно эффективно использование ХМС для ремонта глухих резьб в стенках массивных корпусных деталей. Аналогичным способом восстанавливают шпоночные соединения.

На рисунке 11.1 представлены схемы восстановления резьбных (*а*) и неразъемных (*б*) резьбовых соединений.

При восстановлении резьбного соединения (см. рисунок 11.1, *а*) производят следующие операции:

- сорванную (частично или полностью) резьбу рассверливают до диаметра, превышающего ее наружный диаметр на 1,5–2,0 мм;
- нарезают резьбу (рваную) или канавки диаметром, превышающим диаметр рассверленного отверстия на 1,0–1,5 мм;
- заполняют отверстие композиционным материалом;
- формуют резьбу при помощи болта, смазанного тонким слоем антиадгезива (солидол, минеральным маслом или др.), и выдерживают до полного отверждения матрицы композита;
- вывинчивают (при необходимости) болт.

Для получения неразъемного соединения (см. рисунок 11.1, *б*) и герметизации резьбового соединения (например, для устранения протечек из-за трещин в корпусе, выходящих к резьбовому соединению) восстановление соединения осуществляют следующим образом, если сохранены основания витков и имеется возможность центрирования болта при формовке:

- заполняют отверстие композитом;
- очищают поверхность болта обезжириванием и смазывают слоем композита;
- выдерживают соединение до полного отверждения матрицы композита.

Технология ХМС позволяет устранять риски, задиры и износ поверхностей трения таких ответственных деталей, как штоки гидроцилиндров. Эта технология также удобна для ремонта тонколистовых кузовных деталей. По

сравнению с традиционными термическими способами ремонта (сваркой, пайкой) ХМС не требует демонтажа агрегатов (в частности, слива масла из картеров и емкостей). При ее применении не возникает больших внутренних напряжений и исключается возможность повреждения существующих сварных швов.

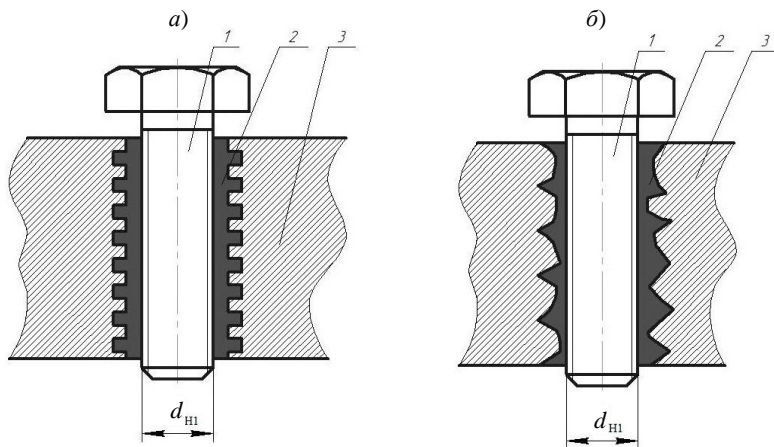


Рисунок 11.1 – Схемы восстановления разъемного (а) и неразъемного (б) резьбовых соединений:

1 – болт; 2 – ремонтный композит; 3 – деталь

Высокое качество восстановления деталей методом ХМС может быть обеспечено только при правильном выборе полимерного материала. В таблицах 11.3 и 11.4 приведены сведения о некоторых РПК, которые свидетельствуют об их довольно широких возможностях.

Перед применением ХМС поверхность детали должна быть предварительно механически очищена и обезжирена. РПК готовят к работе на месте ремонта путем смешения двух компонентов (олигомера с наполнителями и отвердителя).

Если состав наносят для наращивания изношенной поверхности, то предусматривают припуск на последующую механическую обработку (0,15–0,2 толщины наращиваемого слоя).

С помощью ХМС можно успешно заделывать трещины на поверхностях деталей. Различают короткие (до 150 мм) и длинные (более 150 мм) трещины, а также трещины на тонколистовых и толстостенных деталях.

Заделку трещин выполняют в такой последовательности:

- 1) определяют границы трещины и сверлят на ее концах отверстия;
- 2) по всей ее длине снимают фаску и зачищают поверхность по обе стороны трещины;

- 3) очищенный участок и трещину обезжиривают;
- 4) на подготовленную поверхность наносят композицию;
- 5) накладывают стеклоткань так, чтобы она перекрывала трещину на 15–20 мм, и прикатывают ее;
- 6) наносят сверху не менее двух слоев стеклоткани, пропитанных композицией;
- 7) отверждают композицию при комнатной температуре в течение суток;
- 8) испытывают деталь на гидравлическом стенде при давлении воды 0,3–0,4 МПа.

Ремонтные материалы используют для восстановления герметичности фланцевых соединений. На рисунке 11.2 представлены схемы ремонта и восстановления фланцевых соединений при помощи метода ХМС.

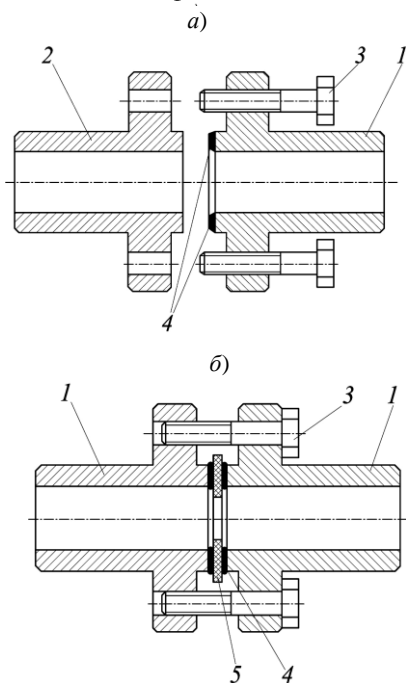


Рисунок 11.2 – Схемы восстановления герметичности фланцевых соединений:
а – восстановление одного фланца; *б* – восстановление двух фланцев;
 1 – восстанавливаемый фланец; 2 – фланец, не подлежащий ремонту; 3 – болты;
 4 – ремонтный материал; 5 – разделительная плита

При восстановлении одного из фланцев стыка (см. рисунок 11.2, *а*) производят следующие операции:

- очищают поверхность ремонтируемого фланца;
- поверхность неповрежденного фланца смазывают антиадгезивом;
- наносят на ремонтируемую поверхность слой РПК;
- соединяют оба фланца и затягивают болты;
- отверждают РПК заданное время;
- удаляют излишки материала;
- разъединяют фланцы, убирают и зачищают натеки.

При восстановлении обоих фланцев (см. рисунок 11.2, *б*) производят следующие операции:

- очищают поверхность ремонтируемых фланцев;
- наносят на поверхности фланцев слой РПК;
- размещают между ними разделительную плиту, обработанную антиадгезивом;
- соединяют оба фланца и затягивают болты;
- отверждают РПК заданное время;
- разъединяют фланцы, убирают и зачищают натеки.

Детали, имеющие пробоины, ремонтируют с помощью упомянутых композиций путем установки специальных накладок. При небольших пробоинах (диаметром до 25 мм) накладки изготавливают из стеклоткани, при диаметре более 25 мм и плоских стенках детали применяют металлические пластины. При небольших пробоинах пластины могут быть укреплены винтами или с помощью дополнительных сверлений в стенке корпуса, куда проникает ремонтная композиция и после отверждения обеспечивает прочную заделку пробоины.

При обработке восстановленных ремонтными материалами деталей на металлорежущих станках для охлаждения резца и удаления стружки рекомендуется применять сжатый воздух. Обычно используют режущий инструмент из быстрорежущей стали и твердых сплавов.

Применение клеевых и ремонтных материалов обладает рядом преимуществ по сравнению с механическими способами соединения деталей сваркой:

- 1) возможностью соединения деталей из разнородных материалов;
- 2) отсутствием внутренних напряжений и коробления, а также влияния на структуру и свойства соединяемых материалов;
- 3) прочностью и герметичностью соединения;
- 4) простотой технологического процесса и применяемого оборудования;
- 5) невысокой трудоемкостью и стоимостью ремонта.

11.2 Восстановление герметиками

Герметики представляют собой материалы (в исходном состоянии жидкие или вязкие композиции) на основе полимеров или олигомеров, способные отверждаться (вулканизироваться) в зазорах между сопрягаемыми металлическими поверхностями с образованием эластичных прослоек, предотвращающих утечку рабочих жидкостей.

По деформационно-прочностным характеристикам их разделяют на эластичные, пластичные и эластопластичные.

В зависимости от механизма формирования герметизирующей прослойки различают герметики термопластичные (невывсыхающие и вывсыхающие) и термореактивные.

Невысыхающие герметики используют в основном для уплотнения неподвижных разъемных соединений или соединений, которые подвергаются периодическому демонтажу. Они представляют собой высоконаполненные (до 50–70 %) материалы на основе высоко- или низкомолекулярных каучуков (полиизобутиленового, бутилкаучука, этилен-пропиленового и др.), которые обратимо переходят из исходного вязкотекучего в эксплуатационное пластичное или эластопластичное состояние. Для уплотнения соединений в машиностроении используют герметики невысыхающего типа 51-Г-3, 51-Г-4М, 51-Г-6, 51-Г-7 и др.

Высыхающие герметики также относятся к термопластичным материалам и представляют собой растворы резиновых смесей в органических растворителях. Их исходное состояние – вязкотекучее, эксплуатационное – эластичное резиноподобное, но при добавлении растворителя они снова переходят в вязкотекучее состояние.

К высыхающим герметикам относятся материалы на основе бутадиен-нитрильного, бутадиен-стирольного, хлорпренового каучука, а также на основе термозластопластов в сочетании со смолами. Их используют для герметизации заклепочных, болтовых и других соединений, для обеспечения непроницаемости кабин, кузовов, контейнеров, трубопроводов и других элементов машин и механизмов.

Терморезистивные герметики – это сшивающиеся (отверждающиеся) или вулканизирующиеся материалы, которые в процессе герметизации необратимо переходят из исходного текучего в эксплуатационное эластичное (резиноподобное) состояние. К ним относятся:

- вулканизирующиеся составы на основе полисульфидных, силиконовых, фторсилоксановых и других каучуков;

- сшивающиеся под действием отвердителей составы на основе низкомолекулярных каучуков и олигомеров, содержащих реакционноспособные группы (ОН, СООН, SH, NCO и др.);

- анаэробные герметики на основе смол акрилового и метакрилового ряда, которые не содержат растворителей, но содержат инициатор и ускоритель полимеризации, а также другие добавки.

Анаэробные герметики (АГ) отверждаются в результате каталитического воздействия металлической поверхности при отсутствии контакта герметика с кислородом воздуха.

По влиянию на скорость отверждения АГ в сопряжении материалы деталей условно делят на три группы: *активные* (медь и ее сплавы, никель), *нормальные* (железо, углеродистые стали, цинк), *пассивные* (высокоуглеродистые стали, алюминий, титан и его сплавы, материалы с антикоррозионными покрытиями, пластики).

Для ускорения отверждения герметика в контакте с инертными материалами в состав материала вводят специальные активаторы (растворы солей металлов переменной валентности или аминов).

Способности АГ заполнять микронеровности и микротрещины на рабочих поверхностях деталей, зазоры в их сопряжениях, фиксировать взаимное положение деталей с различными видами соединений (резьбовыми, фланцевыми, с гладкими поверхностями), быстро отверждаться с образованием прочного соединения позволяют создать эффективную технологию ремонта машин.

АГ имеют следующие *достоинства*:

- возможность герметизации соединений деталей из разнородных материалов;
- устойчивость к воздействию воды, нефтепродуктов и растворителей;
- обеспечение герметичности в зазорах соединений до 0,2–0,5 мм;
- сохранение эксплуатационных характеристик в диапазоне температур от –60 до +250 °С;
- обеспечение герметичности при давлениях до 35 МПа;
- незначительный расход материала и простоту технологического процесса.

АГ применяют в следующих областях:

- для пропитки пористого литья, сварных швов и прессованных изделий;
- контровки и стопорения резьбовых соединений;
- фиксации подвижных соединений;
- уплотнения резьбовых и фланцевых соединений.

Примерами использования АГ могут служить схемы уплотнения различных соединений деталей машин, представленные на рисунке 11.3. Стопорение резьбовых соединений (см. рисунок 11.3, *а*) является весьма ответственной областью применения АГ. Наличие АГ с различными свойствами позволяет подбирать составы герметиков, которые могут обеспечить усилия стопорения соединений в диапазоне от демонтажа с незначительными усилиями до создания практически неразъемного соединения при толщине зазоров до 0,5 мм.

Для герметизации цилиндрических соединений деталей с прессовой посадкой (см. рисунок 11.3, *б*) и их последующего демонтажа при ремонте используют АГ, которые отверждаются в течение пяти часов в узких зазорах толщиной 0,01–0,10 мм.

АГ нечувствительны к воздействию воды, минеральных масел, топлив и растворителей. В большинстве своем они нетоксичны, не оказывают отрицательного воздействия на окружающую среду и обеспечивают надежную антикоррозионную защиту уплотняемых деталей.

Важным достоинством АГ является возможность их применения в сопряжениях деталей из любых материалов в различных сочетаниях при допусках от –0,2 до +0,6 мм. После отверждения они длительное время сохраняют высокие прочностные и усталостные характеристики, обеспечивают 100%-ный контакт сопрягаемых деталей. АГ позволяют значительно повысить надежность конструкций. При установке подшипников на герметик обеспечиваются герметичность и высокая прочность посадки подшипника на вал или посадочное гнездо, устраняются износ и фреттинг-коррозия на посадочных поверхностях. Подшипники можно фиксировать на валу с прочностью на срез до 30 МПа. При этом не возникает внутренних напряжений, которые неизбежны при использовании нагрева для получения прессовых посадок. После выпрессовки посадоч-

ная поверхность остается чистой, и при ремонте узла достаточно повторно нанести герметик.

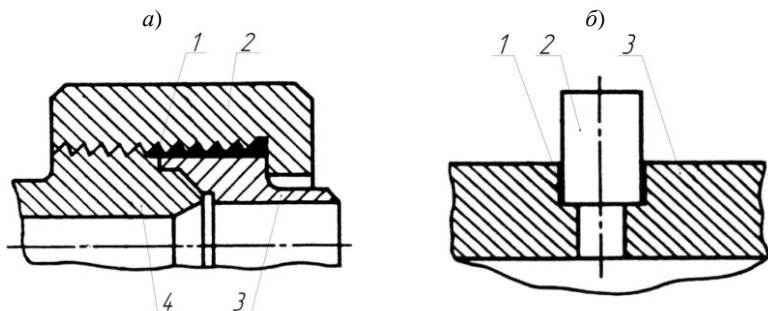


Рисунок 11.3 – Схемы уплотнения и фиксации положения:

а – резьбы штуцерного соединения;

1 – герметик; *2* – гайка; *3* – ниппель; *4* – резьбовая часть штуцера;

б – соединения с гладкими поверхностями:

1 – герметик; *2* – ось; *3* – корпус

Скорость отверждения АГ и время достижения максимальной прочности соединения зависят от температуры окружающей среды. При температурах ниже 15 °С замедляется их отверждение, что обуславливает необходимость применения специальных активаторов.

В ремонтном производстве широко применяют анаэробные составы типа ДН, «Анатерм», «Унигерм» и др. (таблица 11.5).

Некоторые герметики («Унигерм-2М» и «Унигерм-11») отверждаются при температурах до –10 °С, что позволяет выполнять ремонт машин в полевых условиях. Качество уплотнения зависит от материала герметизируемого сопряжения, чистоты поверхностей, контактирующих с герметиком, формы и размеров деталей, технологии сборки и режимов отверждения.

Для правильного выбора марки герметика необходимо учитывать его вязкость и размер зазора между уплотняемыми деталями (см. таблицу 11.5).

Некоторые АГ обладают свойством ускоренного отверждения (см. таблицу 11.5), что позволяет проводить аварийный ремонт в полевых условиях. АГ могут контактировать с различными жидкими и газообразными средами в широком диапазоне температур и давлений без существенного ухудшения их свойств. Перед их нанесением подлежащие сборке поверхности тщательно очищают. Окислы и ржавчину удаляют механическим путем, масляные и другие загрязнения – с помощью растворителей (аcetона, бензина, хлорсодержащих растворителей). Детали после гальванического покрытия можно герметизировать без предварительного обезжиривания. Неметалли-

ческие материалы, отличающиеся большой пористостью, зачищают без обезжиривания.

Таблица 11.5 – Физико-механические свойства анаэробных герметиков

Герметик	Прочность при сдвиге через 24 ч, МПа	Максимальный размер уплотняемого зазора, мм	Температурный диапазон эксплуатации, °С
<i>Обычные герметики</i>			
ДН-1	10–16	0,15	–60...+150
ДН-2	8–14	0,3	–60...+150
Анатерм-4	3–6	0,15	–90...+120
Анатерм-5МД	–	0,25	–60...+150
Анатерм-6	8–15	0,45	–60...+150
Анатерм-6В	8–16	0,4	–100...+150
Анатерм-8	2–8	0,45	–60...+100
Анатерм-17	0,5–3	0,35	–60...+150
Анатерм-18	2–4	0,4	–60...+100
Анатерм-125Ц	1,5–7	0,15	–90...+120
<i>Герметики ускоренного отверждения</i>			
Анатерм-17М	0,5–3	0,4	–50...+150
Анатерм-50у	5–9	0,1	–50...+150
Унигерм-2М	3,3–5,6	0,15	–60...+150
Унигерм-6	10–14	0,3	–60...+150
Унигерм-7	15–22	0,15	–60...+150
Унигерм-8	10–14	0,45	–60...+150
Унигерм-9	10–16	0,3	–60...+150
Унигерм-10	12–16	0,3	–60...+150
Унигерм-11	7–18	0,2	–60...+150

Для сокращения времени отверждения герметиков (в том числе при отрицательных температурах) применяют жидкие *активаторы* (К-101М, КВ и др.). Органические растворители, входящие в их состав, обеспечивают равномерное распределение активатора на поверхности и способствуют ее дополнительному обезжириванию. В частности, К-101М обеспечивает отверждение анаэробных герметиков в течение 24 ч, а КВ – в течение 1 ч при 100 °С.

Расход АГ зависит от их назначения, метода применения и составляет всего:

- 1–5 г на 100 см² поверхности при герметизации цилиндрических соединений с зазором 0,05–0,2 мм;
- 1–5 г на 100 болтов в зависимости от диаметра и высоты резьбы;
- 3–10 г на 1 кг литья при пропитке в зависимости от конфигурации изделия.

В зависимости от применяемых марок герметика и активатора узел может быть введен в эксплуатацию уже через несколько часов.

Для повышения эффективности процесса восстановления герметиками соединений следует выбирать их составы с учетом конструктивных (конфигурации, геометрических размеров и др.), технологических (шероховатости, чистоты поверхности, точности изготовления и др.) и эксплуатационных (температуры окружающей среды, наличия вибраций, деформаций, ударных нагрузок) параметров деталей соединений.

11.3 Нанесение полимерных покрытий

Предприятия, ремонтирующие транспортные средства, машины и механизмы, стремятся использовать технологические процессы, которые имеют низкую энерго- и трудоемкость и позволяют уменьшить износ деталей в узлах трения, восстановить изношенные детали без снижения их качества.

В настоящее время применение полимеров в качестве материалов покрытий деталей и изделий машиностроения является одной из наиболее экономичных областей их использования. Этот вывод базируется на достижениях современного материаловедения по созданию новых полимеров и композиций для покрытий, а также по разработке эффективных технологий получения полимерных покрытий.

Следует отметить, что на первом этапе внедрения полимеров в ряде случаев при их использовании для восстановления деталей не принимали во внимание особенности их физико-механических свойств и поведения под нагрузкой. Нередко металлоизделия заменяли полимерными без изменения их размеров и форм, при этом использовали технологии, разработанные для металлов, что является недопустимым.

Поэтому при выборе типа полимера и метода получения покрытий следует принимать во внимание характер нагрузок на детали, требуемые посадочные размеры, а также возможности ремонтного производства.

Между тем полимеры, как и любые другие материалы, имеют свои достоинства и недостатки, благодаря которым они занимают свою область в машиностроении, не конкурируя с металлами, а дополняя их. Особенно эффективно сочетание полимеров с металлами в виде покрытий на металлоизделиях, когда высокая химическая стойкость и демпфирующая способность полимеров сочетается с прочностными характеристиками металлов.

Технология полимерных покрытий определяется типом и назначением обрабатываемых деталей, свойствами полимерного материала и условиями эксплуатации деталей.

Преимущество полимерных покрытий состоит в том, что допустимый износ деталей может быть установлен в пределах толщины нанесенного слоя покрытия (в интервале 0,3–0,8 мм). Очень важно, что при ремонте вы-

шедших из строя покрытий методы их восстановления не нарушают металлической основы, т. е. не влияют на размеры восстанавливаемой детали.

Между тем, имеется существенное ограничение по применению покрытий (по сравнению с лакокрасочными): покрываемую деталь необходимо нагреть до температуры, превышающей на 50–100 °С температуру плавления наносимого полимера (примерно до 250–400 °С).

Полимерные покрытия целесообразно классифицировать по следующим признакам:

1) *по назначению* – антикоррозионные, электроизоляционные, декоративно-защитные, триботехнические;

2) *по типу полимера* – из термопластичных и термореактивных полимеров;

3) *по исходному состоянию полимера* – из раствора (или суспензии), пленки и порошка;

4) *по температуре предварительного нагрева детали* – нанесение покрытий на нагретую (до температуры $T_{\text{дет}} > T_{\text{пл}}$) и холодную ($T_{\text{дет}} \approx T_{\text{окр.ср}}$) деталь;

5) *по методу нанесения порошковых полимеров* – покрытия, полученные:

– окунанием детали в псевдооживленный слой полимера;

– электростатическим нанесением из псевдооживленного слоя полимера;

– газопламенным напылением;

– газоструйным напылением;

– электростатическим газоструйным напылением.

В качестве материалов для покрытий триботехнического назначения используют алифатические полиамиды, фторопласты, полиолефины, поликарбонаты, эпоксидные и фенолформальдегидные смолы. На их базе изготавливают композиции, включающие специальные добавки, в том числе твердые смазки (дисульфид молибдена, графит и др.), которые используют для нанесения покрытий.

Процесс получения полимерных покрытий (ПП) включает следующие основные операции:

1) подготовку поверхности покрываемой детали;

2) нанесение полимерного слоя на поверхность (горячую или холодную) детали;

3) формирование сплошного беспористого полимерного покрытия при термической обработке системы «деталь – покрытие» ($T > T_{\text{пл}}$);

4) механическую обработку поверхности покрытия.

Первая стадия – *подготовка поверхности детали* – включает:

– очистку от загрязнений;

– механическую обработку;

– термообработку;

– создание промежуточных адгезионноактивных подслоев;

– защиту непокрываемых участков поверхности детали.

От степени подготовки поверхности детали зависит не только качество покрытий, но и работоспособность системы «деталь – покрытие». При этом определяющую роль играет адгезионная прочность покрытий (т. е. проч-

ность сцепления покрытий с поверхностью металла), которая зависит как от чистоты поверхности детали, так и от ее шероховатости.

Очистка от жировых и других загрязнений является непременной операцией по подготовке поверхностей. Обычно для очистки (обезжиривания) используют органические растворители.

Помимо жировых загрязнений на поверхности деталей могут оставаться следы полировочных паст, а также графита, талька, серы. Их устраняют обработкой моющими средствами, которые представляют собой слабо- и среднещелочные бесселикатные составы, состоящие из солей ортофосфорной, борной и других кислот с поверхностно-активными веществами.

Окалину и оксидные пленки удаляют с помощью химического и электрохимического травления в растворах минеральных и органических кислот, в щелочных растворах и др.

При механической обработке деталей преследуются две основные цели:

1) довести размеры детали до требуемых параметров с учетом толщины покрытий; как правило, диаметры охватываемых элементов деталей (валов, цапф) должны быть меньше номинальных размеров на 0,4–1,2 мм, а диаметры охватывающих деталей – больше номинальных на 0,4–1,2 мм;

2) обеспечить шероховатость поверхности детали для увеличения площади ее контакта с полимерным покрытием с целью повышения прочности сцепления полимера и металла; для этого после точения и других видов механической обработки используют дробеструйную, дробеметную обработку, гидropескоструйный метод, а также щеточную и иглофрезную очистку.

Все виды дополнительных операций, необходимых при ремонте деталей (сварка, шлифовка, нарезание резьбы и др.), должны быть выполнены до нанесения покрытия, чтобы не повредить их. После сварки или при пайке все швы должны быть тщательно зачищены, убраны брызги и наплывы металла, а также сняты другие неровности металла (приливы, складки и пр.). Кроме того, на деталях после механической обработки должны быть убраны заусеницы.

Как уже отмечалось, деталь должна выдерживать нагрев до температур, которые определяются режимами термообработки покрываемых деталей:

– прокаливание (после очистки) деталей при температуре 350–400 °С, чтобы сжечь все виды консистентных смазочных материалов, которые могут остаться на поверхностях деталей;

– нагрев деталей (если он предусмотрен технологией) перед нанесением ПП до температур 250–400 °С в зависимости от материала покрытия и теплоемкости детали, чтобы в момент нанесения полимера температура детали превышала температуру плавления (или размягчения) полимера на 50–100 °С.

Вторая стадия процесса – *нанесение полимерного слоя на поверхность детали*. Из упомянутых выше методов выделим наиболее распространенные методы нанесения полимерного слоя на нагретую и холодную детали.

Метод нанесения покрытий окунанием предварительно нагретой детали в псевдооживленный слой частиц полимера реализуют в специальных аппаратах, схема одного из которых представлена на рисунке 11.4, а.

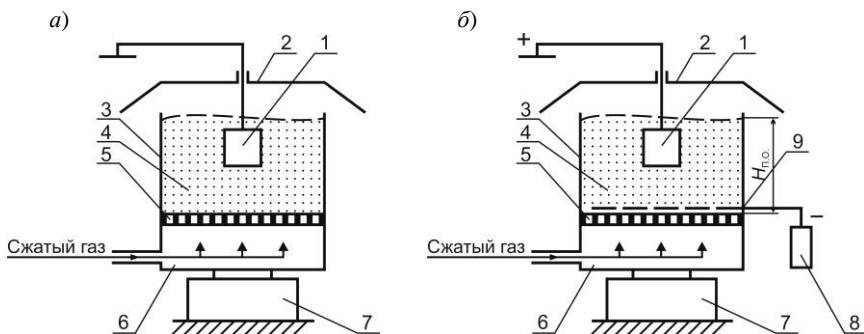


Рисунок 11.4 – Схема аппаратов для нанесения покрытий из псевдооживленного слоя порошкообразного полимера в электрическом поле (б) и без поля (а):

- 1 – деталь; 2 – устройство для рекуперации неиспользованного порошка; 3 – рабочая камера; 4 – псевдооживленный слой полимера; 5 – пористая перегородка; 6 – камера наддува; 7 – вибратор; 8 – источник высокого напряжения; 9 – перфорированный электрод

Аппарат состоит из двух камер, разделенных пористой перегородкой (диаметр пор 10–20 мкм), которую изготавливают из спеченного металла, керамики, стеклоткани или других пористых материалов. В верхнюю рабочую камеру засыпают полимерный порошок (размеры частиц до 315 мкм), а в нижнюю (камеру наддува) подают под давлением воздух или инертный газ. С помощью вибратора заставляют вибрировать полимерный порошок передачей колебаний через пористую перегородку и стенки аппарата. Источником колебаний служит, как правило, электромагнитный вибратор с питанием от электрической сети, обеспечивающий частоту колебаний 50 Гц. Режим вибрации (в частности, амплитуду колебаний) регулируют путем изменения напряжения в сети.

При совместном действии вибрации и сжатого газа слой порошка в рабочей камере переходит в так называемое псевдооживленное (взвешенное) состояние, которое характеризуется увеличенным в 1,5–2,0 раза объемом порошка (по сравнению с насыпным слоем) и низкой плотностью.

Для нанесения покрытия деталь нагревают (до указанных ранее температур), затем окунают на 10–15 с в псевдооживленный слой полимерного порошка. В результате на деталь налипают слой частиц, толщина которого зависит от теплоемкости детали, температуры ее предварительного нагрева и времени ее пребывания в псевдооживленном слое.

Для выполнения операции нанесения покрытия необходимо иметь следующее оборудование:

- 1) источник сжатого воздуха (компрессор и др.), обеспечивающий давление 0,1–0,5 МПа, с регулятором давления;
- 2) электромагнитный вибратор, обеспечивающий частоту вибрации 50 Гц;

- 3) масловодоотделитель для очистки поступающего в аппарат воздуха;
- 4) электрический подогреватель воздуха для его сушки (до 80–100 °С) и снижения скорости охлаждения нагретой детали;
- 5) камеру термообработки.

Нанесение покрытий этим способом можно производить вручную или в автоматическом режиме. В последнем случае аппарат псевдооживления входит в состав автоматической линии, которая включает подвесной конвейер, движущийся с равномерной скоростью, к которому на равном расстоянии друг от друга подвешивают детали, и проходные термокамеры.

Электростатическое нанесение покрытий из псевдооживленного слоя полимеров. Эти методы позволяют существенно расширить технологические возможности нанесения покрытий с использованием псевдооживленного слоя, поскольку электрическое поле устраняет необходимость в предварительном нагреве покрываемой детали.

Для реализации этого метода аппарат псевдооживления дополнительно оснащают электродом (в виде перфорированного металлического листа, проволочной сетки или системы игл), который подключают к источнику высокого напряжения (рисунок 11.4, б). В свою очередь покрываемую деталь заземляют. При подаче на электрод высоковольтного потенциала частицы полимера заряжаются в поле его коронного разряда, перемещаются под действием электрического поля к заземленной детали и осаждаются на ее поверхности ровным и плотным слоем. Высокое электрическое сопротивление полимерных порошков ($\rho_v > 10^{18}$ Ом·см) препятствует интенсивному стеканию электрического заряда, и слой заряженных частиц полимера удерживается на поверхности детали длительное время, достаточное для перемещения детали со слоем порошка в термопечь и оплавления покрытия.

В качестве источника постоянного напряжения используют электростатические генераторы любых типов, которые могут обеспечить изменение потенциала в диапазоне 10–100 кВ (при силе тока от 150 мкА до 150 мА). Для обеспечения безопасности работы обслуживающего персонала аппарат снабжают системой защиты, автоматически отключающей источник в аварийных ситуациях.

Электростатическое газоструйное напыление частиц полимера производят с помощью комплекта оборудования, в который входят ручной распылитель, снабженный системой, обеспечивающей безопасность эксплуатации; источник высокого напряжения; бункер-питатель с дозатором полимерного порошка, оснащенный системой масловодоотделения; источник сжатого воздуха; камера напыления, снабженная системой вентиляции и рекуперации использованного порошка, а также подводящие коммуникации.

Основным элементом оборудования является ручной распылитель (рисунок 11.5), который состоит из диэлектрического корпуса, канала подачи воздушно-порошковой смеси, коронирующего электрода, соединенного с

источником высокого напряжения, рассекателя и рукоятки с заземленной металлической накладкой.

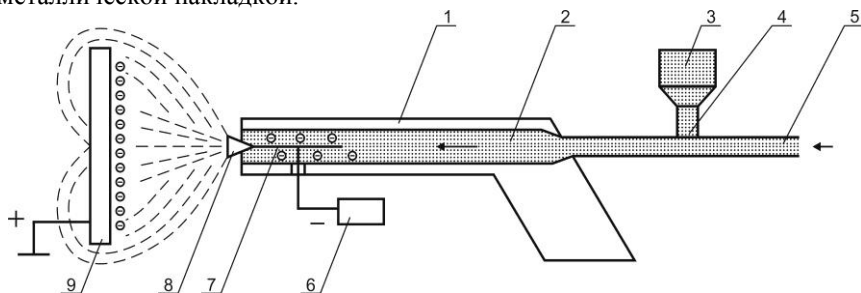


Рисунок 11.5 – Схема распылителя для нанесения покрытий электрогазоструйным напылением порошкообразного полимера:

1 – корпус распылителя; 2 – камера подачи частиц порошка; 3 – бункер для порошка полимера; 4 – дозирующее устройство; 5 – транспортирующий воздух; 6 – источник высокого напряжения; 7 – высоковольтный проволочный электрод; 8 – отражатель (рассекатель потока частиц); 9 – деталь

Напыление покрытия осуществляют на заземленную «холодную» деталь путем подачи воздушно-порошковой смеси через канал распылителя. На выходе из канала частицы порошка заряжаются в коронном разряде высоковольтного электрода и осаждаются плотным слоем на заземленную деталь в электрическом поле, которое возникает между коронирующим электродом и заземленной деталью. Как уже отмечалось, частицы в электроосажденном слое на детали удерживаются длительное время, которого вполне достаточно для проведения с деталью последующих технологических операций.

Это же оборудование можно использовать для газоструйного нанесения покрытий (на предварительно нагретую деталь), для этого достаточно отключить подачу высокого напряжения на распылитель.

Третья стадия техпроцесса – *формирование сплошного беспористого полимерного покрытия при термической обработке детали с покрытием*. Именно на этой стадии закладывается комплекс адгезионных, физико-механических, триботехнических и других свойств покрытий. *Основными параметрами*, определяющими эксплуатационные свойства и технические характеристики покрытий, являются *температура* и *время термического воздействия* при их формировании. Поэтому выбор оптимальных температурно-временных режимов формирования покрытий является очень ответственной задачей.

На рисунке 11.6 представлены данные по влиянию температуры формирования покрытий на их физико-механические и адгезионные характеристики. Экстремальный характер зависимости свидетельствует о необходимости точного выбора параметров, обеспечивающих формирование беспо-

ристого сплошного покрытия, обладающего высоким уровнем физико-механических свойств и прочным сцеплением с поверхностью детали.

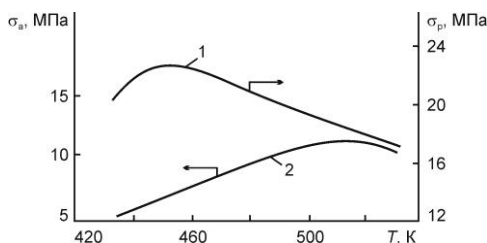


Рисунок 11.6 – Влияние температуры формирования на свойства покрытий из полиэтилена:
 1 – прочность покрытий при одноосном растяжении;
 2 – прочность адгезионных соединений при нормальном отрыве

Каждая из перечисленных стадий является достаточно значимой и влияет на эксплуатационные характеристики покрытий. Но самой главной является стадия формирования полимерных покрытий при термическом воздействии, поскольку именно на этой стадии происходит плавление полимера и выдержка в расплавленном (жидком) состоянии на поверхности детали для образования (после охлаждения) беспористого сплошного слоя покрытия с высокими показателями эксплуатационных характеристик. Именно эта стадия отличает процессы получения полимерных и металлических покрытий. Для металлических покрытий стадия плавления наносимого металла на поверхности детали вообще отсутствует, а формирование слоя покрытия происходит при переносе и растекании капель расплава на покрываемой поверхности.

Некоторое представление о физико-механических свойствах покрытий из термопластичных полимеров дает таблица 11.6. В ней приведены деформационно-прочностные характеристики различных изделий из термопластов.

Таблица 11.6 – Деформационно-прочностные свойства покрытий из термопластов

Материал	Покрытия		Литьевые или прессованные изделия	
	σ _р , МПа	ε _р , %	σ _р , МПа	ε _р , %
Полиэтилен низкого давления	190–220	6–7	220–300	300–800
Политрифторхлорэтилен	300–350	15	350–400	20–40
Пентапласт	350–400	10–20	400–550	15–40
Поливинилхлорид	500–550	4–8	450–700	5–40
Поливинилбутираль	230–260	2–3	280–500	5–15
<i>Примечание – σ_р, ε_р – прочность и относительное удлинение при растяжении.</i>				

Как видно из таблицы, в большинстве случаев покрытия из порошкообразных полимеров уступают другим видам изделий по своим физико-

механическим свойствам. Это обусловлено особенностями их состояния – высокоразвитой поверхностью и малой площадью контакта частиц между собой. Нагрев в среде воздуха на стадии пленкообразования сопровождается термоокислительными процессами, протекающими в порошкообразном материале с высокой интенсивностью вследствие большой поверхностной площади контакта частиц с кислородом воздуха. Термоокисление способствует ухудшению физико-механических свойств, но ощутимо повышает адгезию полимеров к металлам.

Последняя стадия процесса – *механическая обработка покрытий* – также оказывает значительное влияние на их долговечность. На ресурс ПП деталей (в виде тел вращения) влияют как подготовка поверхности, так и точность токарной обработки под номинальный размер.

Режимы обработки резанием покрытий из полимеров зависят от их температуры плавления. Основным требованием является минимально возможное время обработки (при наименьшей поверхности контакта режущего инструмента с покрытием), чтобы избежать перегрева локальных участков поверхности покрытий, которые могут привести к их отслаиванию.

Из опыта применения покрытий в узлах трения следует, что в качестве материалов покрытий, как уже отмечалось, используют в основном композиции на основе полиамидов, эпоксидных смол, полиолефинов, фторопластов и др. Если сопоставить триботехнические характеристики монолитных деталей из полимеров и покрытий из них на стальных деталях, то следует отметить низкую теплопроводность, значительную деформацию под нагрузкой и, как следствие, низкие значения нагрузочной способности монолитных деталей из полимеров. Применение тонкослойных покрытий позволяет существенно снизить тепловую напряженность узла трения, чему способствует отбор тепла через металлическую основу детали, и значительно повысить нагрузочно-скоростные параметры.

В узлах трения покрытия (на металлических деталях) могут работать как без смазки, так и с постоянной подачей масла к трущимся поверхностям. Естественно, что допустимые величины нагрузочно-скоростных параметров узлов будут существенно различаться.

При работе в режиме самосмазывания (в условиях сухого трения) работоспособность деталей с покрытиями сохраняется в диапазоне нагрузок 0,2–1,0 МПа при скоростях скольжения до 1 м/с. С ростом параметров нагрузочно-скоростных режимов она резко падает. При этом наблюдается интенсивный разогрев и размягчение полимера, что сопровождается существенным ростом коэффициента трения и снижением износостойкости.

С введением в зону трения смазки значительно изменяется характер трения и износа: расширяется интервал нагрузочной способности, уменьшается коэффициент трения и повышается износостойкость. В частности, стальные подшипники скольжения с покрытиями из полимеров выдерживают нагруз-

ки, достигающие 20 МПа (при скоростях скольжения до 1 м/с), т. е. на порядки более высокие нагрузки, чем в режиме сухого трения.

Как известно, довольно часто узлы трения выходят из строя из-за перебоев в подаче смазки к трущимся поверхностям. Поэтому особое значение имеет способность полимерных покрытий длительное время сохранять на поверхности пленку смазки и работать без заедания при нарушении ее подачи. В частности, длительность работы покрытий из поликапроамида по стали со стабильным коэффициентом трения превышает 8 часов, в то время как для бронзы и баббита при трении по стали уже через несколько минут после прекращения подачи смазки этот коэффициент увеличивается в три раза.

Сравнительная оценка износостойкости стальных втулок с тонкослойными покрытиями из поликапроамида и бронзовых втулок показывает, что покрытия имеют в 3–7 раза меньший износ, чем втулки из бронзы, при этом износ контртела (стальной оси) также значительно меньше при контакте с полимерными покрытиями. Замена деталей узлов трения из цветных металлов тонкослойными покрытиями экономически оправдана, поскольку срок службы стальных втулок с полимерными покрытиями при нагрузках до 20 МПа и скоростях скольжения до 1 м/с в 2–4 раза больше, чем бронзовых деталей.

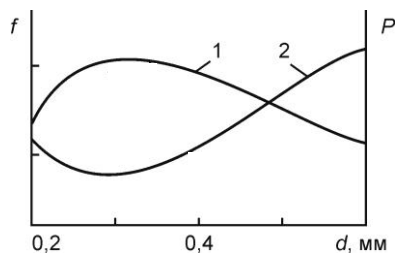


Рисунок 11.7 – Влияние толщины покрытий из поликапроамида на нагрузочную способность покрытий (1) и коэффициент трения (2)

что вызывает рост коэффициента трения. При толщине покрытий, превышающей оптимальную, коэффициент трения возрастает вследствие ухудшения теплоотвода из зоны трения.

Область применения антифрикционных покрытий, как уже отмечалось, ограничена допускаемыми величинами нагрузочно-скоростных режимов в узлах трения машин и механизмов: $[p] = 20$ МПа; $[v] = 1$ м/с.

В машинах (транспортных и транспортирующих, погрузочно-разгрузочных и подъемно-транспортных, дорожно-строительных и др.) ПП используют в приводах, ходовом оборудовании и других узлах. В приводах они

Оптимальные толщины антифрикционных полимерных покрытий зависят от физико-механических свойств полимера и шероховатости контртела, конструкции узла трения и условий его эксплуатации. Как правило, зависимость коэффициента трения от толщины покрытий имеет экстремальный характер (рисунок 11.7). С уменьшением толщины покрытий (меньше оптимальных значений) снижается демпфирующая способность покрытий и растет жесткость системы,

находят применение в силовых установках – для ремонта и восстановления посадочных мест в картерах двигателей, деталей двигателей (элементов клапанов, гильз цилиндров и др.); в трансмиссиях – для восстановления посадочных мест в коробках передач и редукторах, различных валов в местах сопряжения с другими деталями, в том числе с подшипниками (в этом случае ПП выполняют также функции уплотнений); в системах управления – для ремонта элементов регулирующей и вспомогательной аппаратуры (топливных и водяных насосов, вентиляторов, карбюраторов и др.).

В ходовом оборудовании ПП защищают от износа детали переднего и заднего мостов (ступицы колес, поворотные цапфы, элементы тормозных устройств и др.).

В частности, ПП применяют для ремонта прессовых соединений путем восстановления посадочных мест под подшипники качения в корпусных изделиях (в коробках передач, в раздаточных и бортовых редукторах и др.). На посадочные отверстия для подшипников, расточенные на 1,0–1,5 мм больше номинального диаметра, наносят слой ПП, а затем растачивают отверстия с соответствующим допуском относительно номинального размера, после чего собирают узел традиционными методами. Помимо того, с учетом конструктивных особенностей корпусных изделий в ряде случаев выгоднее наносить покрытия на внешнюю поверхность кольца подшипника. Для этого после расточки и центрирования гнезда в корпусе на внешнее кольцо подшипника наносят слой полимера толщиной 1,0–1,5 мм, затем обтачивают на токарном станке до номинального размера с рекомендуемым допуском и запрессовывают в гнездо. ПП наиболее целесообразно использовать в тех соединениях, которые приходится неоднократно разбирать при ремонтных работах и периодических техосмотрах.

Не менее распространенной областью применения ПП является пара «подшипник скольжения – вал» в узлах и механизмах различных машин. В зависимости от решаемых задач ПП можно наносить как на внешнюю поверхность вала, так и на внутреннюю поверхность втулки подшипника. При повышенных скоростях и нагрузках чаще используют пару «вал – подшипник с покрытием». В случае необходимости повышения долговечности и ремонтпригодности вала наносят покрытия на его поверхность в зоне контакта с подшипником.

Очень важным достоинством ПП является высокий уровень ремонтпригодности. При восстановлении ПП необходимо учитывать следующие обстоятельства:

1) удаление пришедшего в негодность покрытия производят с помощью газовой горелки при температурах, обеспечивающих сгорание полимера;

2) удаление покрытия можно осуществить на металлорежущих станках, если обеспечено необходимое центрирование детали;

3) повторная механическая обработка (точение, фрезерование) поверхности детали, как правило, не производится;

4) процесс восстановления покрытия совпадает с упомянутой технологией их получения;

5) при каждом капитальном ремонте узла или агрегата машины покрытия следует заменить новыми даже в тех случаях, когда на них не обнаружено дефектов.

11.4 Защитно-декоративная отделка деталей и конструкций

Для повышения защитной способности деталей и конструкций, эксплуатирующихся в атмосферных условиях, придания им декоративных свойств используют лакокрасочные покрытия. Эти покрытия формируют в результате пленкообразования и высыхания лакокрасочных материалов, нанесенных на поверхность деталей и конструкций машин. Для нанесения покрытий используют материалы с определенной вязкостью (20–60 с по методике ВЗ-4).

Покрытия, формируемые из лакокрасочных материалов, целесообразно разделить по следующим признакам:

– *по назначению покрытий* – антикоррозионные, декоративные и защитно-декоративные;

– *по назначению слоев* – грунтовочные, шпатлевочные и покровные (краски, эмали, лаки);

– *по природе пленкообразующего* – на основе алкидных, полиэфирных, эпоксидных, полиуретановых и других смол;

– *по методу нанесения* – кистью, валиком, обливом, окунанием, а также аэрозольным, воздушным, безвоздушным и электростатическим распылением;

– *по степени автоматизации процесса нанесения* – ручным, механизированным и комбинированным способами, автоматизированным при помощи роботизированных окрасочных агрегатов;

– *по способу сушки* – холодной, конвективной, терморadiационной и индукционной сушкой.

Лакокрасочные материалы имеют сложные многокомпонентные составы. Их наиболее важными компонентами являются пленкообразователи, растворители и пигменты. Кроме того, в их состав входят различные специальные добавки (наполнители, пластификаторы, сиккативы, отвердители, инициаторы и ускорители полимеризации, катализаторы, эмульгаторы и др.). Добавки обеспечивают необходимые технологические характеристики (вязкость, смачиваемость, укрывистость, адгезионную способность и др.) материалу при нанесении покрытий и эксплуатационные свойства (прочность, пористость, антикоррозионные свойства, стойкость к воздействию окружающей среды и др.) готовым покрытиям.

Пленкообразователи определяют основные свойства покрытий: адгезию, прочность, стойкость к воздействию окружающей среды и др. В большинстве случаев пленкообразователи являются олигомерами или полимерами с небольшой молекулярной массой. Они могут быть термопластичными или термоотверждаемыми.

Растворители придают требуемую вязкость и растекаемость пленкообразователю при нанесении пленки на окрашиваемую поверхность. В качестве растворителей применяют углеводороды, спирты, кетоны, сложные и простые эфиры.

Пигменты – это нерастворимые порошкообразные материалы, которые придают покрытиям нужный цвет, повышают их прочность и улучшают адгезионные свойства покрытий.

На рисунке 11.8 представлена базовая структура лакокрасочного покрытия, которое содержит только основные слои, но каждый из них в свою очередь может иметь несколько подслоев. Толщина покрытий обычно составляет 50–100 мкм, реже – до 300 мкм. Покрытия представляют собой многослойные системы с толщиной каждого слоя от 10 до 40 мкм. Как видно из рисунка, структура лакокрасочного покрытия в общем случае намного сложнее, чем металлических или полимерных покрытий.

Нижние слои покрытий должны обеспечивать прочное сцепление с поверхностью защищаемой детали и обладать антикоррозионными свойствами. Для этого используют *грунтовочные материалы*, которые содержат лаки и пигменты, т.е. это пигментированные растворы пленкообразующих веществ в органических растворителях.

Затем следуют *шпатлевочные слои*, одной из основных функций которых является выравнивание поверхности защищаемой конструкции и заделка сварных и заклепочных швов. Поэтому они имеют вязкость, значительно более высокую, чем другие материалы. Это достигается введением в состав шпатлевок большого количества пигментов и наполнителей.

Верхние слои обеспечивают поверхности покрытий стойкость к атмосферным воздействиям и необходимые декоративные характеристики. Для нанесения верхних слоев используют в основном *краски*, реже – *лаки*. Количество слоев – от двух до восьми.

Масляные краски – это материалы в виде суспензии пигментов (или пигментов и наполнителей) в олифах или специально подготовленных растительных маслах. Их используют для получения грунтовочных и верхних слоев покрытий. Однако они имеют невыгодную технологическую особенность – медленное высыхание (24 часа при температуре 18–20 °С).

Эмали (эмалевые краски) – это суспензии пигментов (или смесей пигментов с наполнителями) в лаках. Их используют в качестве верхних слоев покрытий, поскольку они придают покрытиям требуемый цвет, укряви-

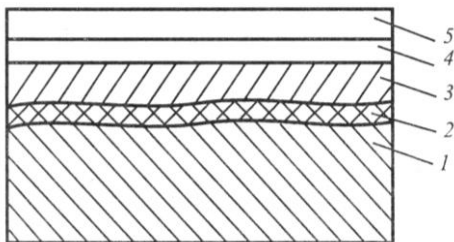


Рисунок 11.8 – Структура лакокрасочного покрытия:

1 – покрываемая деталь; 2 – грунт; 3 – шпатлевка; 4 – слой краски; 5 – слой лака

стость и стойкость к внешним воздействиям. По сравнению с масляными красками эмали имеют значительно меньшее время высыхания, особенно эмали горячей сушки.

Лаки – это растворы пленкообразующих материалов в летучих органических растворителях, которые в качестве самого верхнего слоя служат для получения прозрачных (блестящих или матовых) покрытий.

Для защитно-декоративной отделки конструкций машин применяют различные лакокрасочные материалы, которые отличаются природой пленкообразователя, типом растворителя, набором пигментов и наполнителей, технологическими и эксплуатационными свойствами. В их числе масляные краски, битумные лаки и эмали, алкидные и алкидно-стирольные эмали, фенолформальдегидные, полиуретановые лаки и эмали, лаки и эмали на эпоксидных смолах, кремнийорганической и полиамидной основах, на основе сополимеров винилхлорида и акриловых сополимеров и др.

Технологический процесс получения лакокрасочных покрытий в общем случае включает следующие основные операции:

- подготовку защищаемой поверхности детали к окраске (очистка от жировых и других загрязнений, продуктов коррозии и старых красок, мойка и сушка);

- приготовление окрасочных материалов (перемешивание материала, разбавление растворителем до заданной рабочей вязкости);

- нанесение лакокрасочных материалов (грунтование, шпатлевание, шлифование, окраска, сушка);

- контроль качества окраски.

Столь обширный набор различных лакокрасочных материалов с разными технологическими характеристиками предопределяет широкий спектр методов их нанесения в виде покрытий и устройств для их осуществления.

Нанесение лакокрасочных покрытий осуществляют кистью или валиком, окунанием, обливанием, распылением и другими методами в зависимости от формы и габаритов детали или конструкции, состава лакокрасочного материала и требований к защитно-декоративным покрытиям.

Воздушное (или пневматическое) распыление является наиболее распространенным методом нанесения покрытий как на масляной основе, так и на быстролетучих растворителях (нидролаки, нитроэмали). Для его осуществления используют устройства и установки, которые можно классифицировать по следующим признакам:

- по величине давления воздуха – с низким (0,3–0,5 МПа) и высоким (0,5–0,7 МПа) давлением;

- по степени подвижности – переносные, передвижные и стационарные;

- по наличию нагрева – без нагрева и с подогревом;

- по способу подачи краски в распылитель – напорным и инжекторным способом;

- по типу смешения краски с воздухом – с внутренним и наружным смешением.

Метод пневматического распыления применим практически в любых производственных условиях при наличии источника сжатого воздуха. Типичная установка для пневматического распыления обычно состоит из пистолета-распылителя, нагнетательного бака и масловодоотделителя. На рисунке 11.9 представлена принципиальная схема одного из вариантов установки для реализации этого метода. Лакокрасочный материал из бака 1 нагнетается в распылитель 3 (снабженный распыляющими форсунками) и под давлением (0,5 МПа) сжатого воздуха распыляется в виде тонкодисперсных капель на окрашиваемую поверхность. Во избежание порообразования в покрытиях воздух предварительно очищают от влаги и масла в устройстве 7.

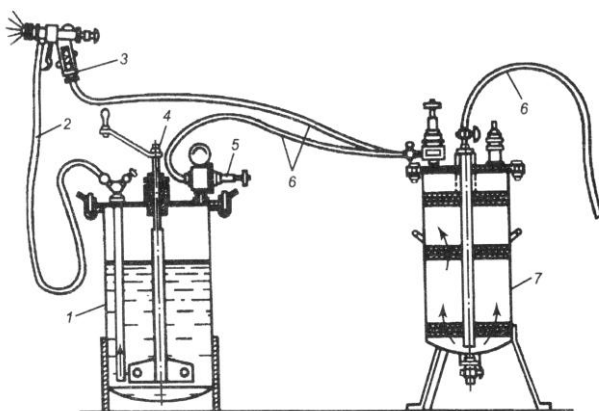


Рисунок 11.9 – Схема пневматической краскораспылительной установки:
 1 – бак; 2, 6 – шланги; 3 – краскораспылитель; 4 – устройство для перемешивания;
 5 – регулятор давления; 7 – масловодоотделитель

Для повышения качества покрытия и увеличения производительности процесса используют подогрев краски, для чего установку дополнительно оснащают подогревателем, обеспечивающим нагрев краски на выходе из краскораспылителя до 50–60 °С.

В комплекте с окрасочными агрегатами применяют пневматические краскораспылители, которые используют для небольших объемов работ. Схема одного из вариантов краскораспылителя представлена на рисунке 11.10. На корпусе 1 устанавливают сменную распылительную головку 3, а также верхний 2 или нижний 4 наливные стаканы с краской.

Методом пневматического распыления наносят около 70 % выпускаемых лакокрасочных материалов. Причиной широкого применения этого метода является приемлемый баланс соотношения «качество покрытий – стоимость оборудования для их получения».

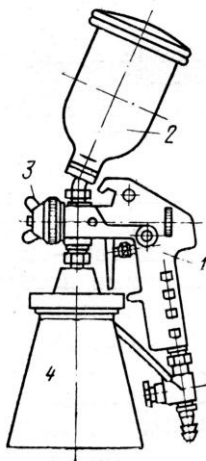


Рисунок 11.10 – Схема портативного краскораспылителя:

1 – корпус; 2 – верхний наливной стакан; 3 – сменная головка; 4 – нижний наливной стакан

Безвоздушное распыление лакокрасочных материалов осуществляется под значительно более высоким давлением и относится к более экономичному способу нанесения по сравнению с пневматическим. Термин «безвоздушное распыление» весьма условный, поскольку сжатый воздух используют, но только для привода насоса, создающего высокое давление на краску.

Безвоздушное распыление на 20–30 % сокращает расход лакокрасочных материалов, в 1,5–3,0 раза увеличивает производительность и значительно повышает качество покрытий за счет уменьшения пористости и повышения плотности покрытий.

Для его осуществления используют установки, которые классифицируют по следующим признакам:

– по величине давления краски – с низким (4–10 МПа), средним (10–16 МПа), высоким (16–25 МПа) и сверхвысоким (более 25 МПа) давлением;

– по способу перемещения – переносные, передвижные и стационарные;

– по производительности – малой (до 2 л/мин), средней (2–4 л/мин) и большой (более 4 л/мин);

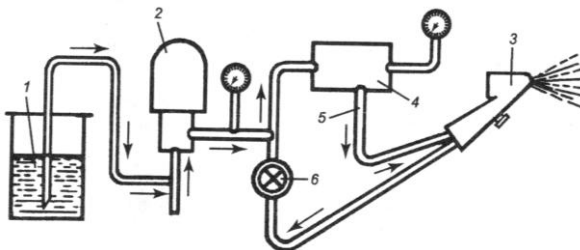
– по наличию нагрева – без нагрева и с нагревом;

– по расположению пневмонасоса – закрепленный на крышке бака и смонтированный отдельно от бака.

Типичная установка безвоздушного распыления (рисунок 11.11) содержит бак для краски 1, пневмонасос высокого давления 2, распылитель 3 (с набором распыляющих устройств), шланги высокого давления 5 и (при необходимости) подогреватель краски 4.

Рисунок 11.11 – Схема установки для безвоздушного распыления лакокрасочного материала:

1 – бак; 2 – насос; 3 – распылитель; 4 – подогреватель; 5 – шланг; 6 – шестеренчатый насос



Распыляющее устройство определяет эффективность нанесения краски и работы всей установки. Оно состоит (рисунок 11.12) из корпуса 1, в который запрессовано сопло 2, а с другой стороны установлен ускоритель 3. Пространство между соплом и ускорителем образует расширительную камеру 4. С помощью ускорителя увеличивается скорость движения краски перед выходом из сопла 2. При выходе краски из сопла 2 давление падает до уровня атмосферного, в результате чего растворитель практически мгновенно испаряется и при этом улучшается распыление краски.

Конструкция распыляющего устройства обеспечивает резкое расширение объема материала, что способствует уменьшению дисперсности частиц краски.

Этот метод имеет ряд преимуществ по сравнению с пневматическим распылением. В их числе возможность нанесения практически любых лакокрасочных материалов, относительно небольшой расход лакокрасочного материала и растворителя, более высокое качество покрытий и высокая производительность.

Распыление в электрическом поле является развитием безвоздушного распыления и наиболее эффективным методом нанесения лакокрасочных покрытий. Частицы лакокрасочного материала заряжают в поле коронного разряда, который генерирует краскораспылитель, подключенный к источнику высокого напряжения, и переносят на поверхность заземленной детали в электрическом поле.

Для эффективного распыления в электрическом поле лакокрасочные материалы должны иметь необходимые электрофизические характеристики: удельное электрическое сопротивление в пределах $\rho_v = 10^6 \dots 10^7$ Ом · см и диэлектрическую проницаемость в интервале $\epsilon = 6 \dots 10$. Если значения ρ_v и ϵ выходят за указанные пределы, их можно скорректировать за счет разбавления материала краски растворителями.

Для его осуществления используют установки, которые классифицируют по следующим признакам:

- по способу перемещения – переносные, передвижные и стационарные;
- по типу распылителя – электромеханический, пневмоэлектрический и электрогидравлический (безвоздушный);
- по типу коронирующего электрода – со щелевым (неподвижным) и чашевидным (вращающимся) электродом.

Окраску производят при помощи стационарных и передвижных установок на конвейерных линиях, а также ручными распылителями. Для небольших объемов окрасочных работ используют различные комплекты пере-

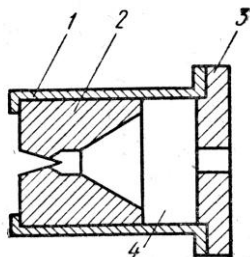


Рисунок 11.12 – Схема распыляющего устройства:

1 – корпус; 2 – сопло; 3 – ускоритель; 4 – расширительная камера

движного оборудования. В состав типичного комплекта входят компрессор, снабженный системой маслоразделения, красконагнетательный бак с регулятором давления, электронагреватель с терморегулятором, ручной распылитель, оснащенный системой безопасности эксплуатации; источник высокого напряжения (до 100 кВ), а также подводящие коммуникации.

Основным элементом оборудования является ручной краскораспылитель (рисунок 11.13), который состоит из диэлектрического корпуса 4, рукоятки 13 (в ней установлены выключатель 11 и другие элементы управления), канала подачи краски 8, коронирующего электрода-распылителя 6, соединенного кабелем 9 с источником высокого напряжения и вращающегося от электродвигателя 1 через вал 3. Распыление частиц краски происходит при вращении чаши распылителя 6 и подаче на него высокого напряжения. Частицы краски получают заряд на краях коронирующего электрода, под действием центробежных сил распыляются и осаждаются на заземленной детали.

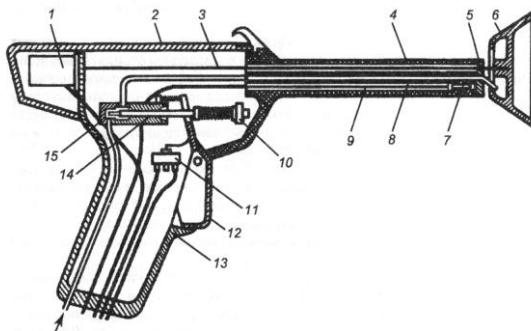


Рисунок 11.13 – Схема электростатического распылителя:

- 1 – электродвигатель;
- 2 – кожух; 3 – вал;
- 4 – корпус; 5 – втулка;
- 6 – распылитель; 7 – резистор; 8 – канал; 9 – кабель;
- 10 – гайка; 11 – выключатель; 12 – курок; 13 – рукоятка; 14 – игла; 15 – клапан

Производительность подобного распылителя составляет 50–200 м²/ч. Достоинством метода является значительно меньшие потери лакокрасочных материалов по сравнению с другими методами окрашивания деталей и конструкций. К недостаткам следует отнести трудности в окраске деталей сложной конфигурации с глубокими впадинами, что вынуждает использовать комбинированные распылители, сочетающие распыление в электрическом поле и окраску под действием только сжатого воздуха (в отсутствие поля). Кроме того, имеются ограничения по электрофизическим параметрам лакокрасочных материалов и материалов защищаемых деталей.

Сушка является завершающей стадией процесса нанесения покрытий. Как правило, *естественную холодную сушку* (15–23 °С) применяют для быстровысыхающих термопластичных материалов (нитроцеллюлозных, перхлорвиниловых и др.), а также при нанесении покрытий на крупногабаритные конструкции. Продолжительность сушки быстровысыхающих материалов составляет 1–3 ч.

Более эффективной является *искусственная сушка* (конвективная, терморadiационная и индукционная), которую осуществляют при температу-

рах 60–180 °С, применяя специальное оборудование. В частности, *конвективную сушку* выполняют в сушильных камерах потоком горячего воздуха, что сокращает процесс сушки до 0,5 ч. *Терморadiационную сушку* осуществляют под действием ИК-излучения, которое прогревает сначала поверхность металла, а затем и покрытия. Такое направление теплового потока обеспечивает беспрепятственное улетучивание растворителя. В результате формируется более качественное покрытие за более короткий (в 2–3 раза) промежуток времени по сравнению с конвективной сушкой. *Индукционную сушку* осуществляют путем нагрева детали с покрытием вихревыми токами, для чего необходимо специальное оборудование (включая индуктор), повторяющее форму детали. Продолжительность сушки составляет несколько минут.

Контроль качества окраски является завершающей стадией процесса нанесения лакокрасочных покрытий. Качество покрытий характеризуют комплексом показателей, в числе которых как качественные показатели (цвет, чистота, глянец), так и количественные (толщина, твердость, адгезия, прочность, стойкость к воздействию агрессивных сред и др.).

Контрольные вопросы к разделу 11

- 1 В чем состоит сущность холодной молекулярной сварки?
- 2 Какие виды полимеров используют в ремонтных полимерных композитах?
- 3 Дайте классификацию герметиков по основным признакам.
- 4 Что такое анаэробные герметики?
- 5 Классифицируйте полимерные покрытия по основным признакам.
- 6 Изобразите схемы аппаратов псевдооживления для нанесения покрытий на холодную и горячую поверхность деталей.
- 7 Назовите области применения триботехнических полимерных покрытий по нагрузке и скорости.
- 8 Классифицируйте лакокрасочные покрытия по основным признакам.
- 9 Покажите структуру лакокрасочного покрытия.
- 10 В чем состоят достоинства распыления лакокрасочных материалов в электростатическом поле?
- 11 Какие установки используют для безвоздушного распыления лакокрасочных материалов.

Производство промышленной продукции, в том числе продукции машиностроения, является весьма затратным: на него расходуется только треть сырьевых ресурсов, остальные ресурсы утрачиваются в виде отходов производства или побочных продуктов. Поэтому в индустриальных странах ресурсосбережение уже более четверти века является доминантой развития различных отраслей машиностроения. Как следствие, изменилось отношение к отходам производства и потребления, которые во многом превратились в источник материальных и энергетических ресурсов. В результате энергоемкость единицы ВВП в Евросоюзе (ЕС) в четыре раза ниже, чем в странах СНГ, которые существенно отстают в плане ресурсосбережения и утилизации отходов.

Наличие не переработанных отходов продукции машиностроения (транспортных средств и транспортно-технологических машин) обуславливает загрязнение окружающей среды (почвы, воды, воздуха), поэтому объемы их утилизации в конечном счете определяют уровень экологической безопасности. Зарубежный и отечественный опыт показывает, что отсутствие системного подхода к организации сбора и переработки вторичных ресурсов транспортного комплекса влечет за собой экологические и экономические проблемы. О масштабах этих проблем свидетельствуют следующие цифры: мировой парк только автотранспортных средств превышает 600 млн единиц при ежегодном выводе из эксплуатации 40–50 млн машин.

Законы об утилизации автотранспортных средств приняты более чем в 50 странах мира. Обращение с отходами производства регламентируется нормативно-правовыми актами и контролируется государственными органами. При этом предприятия несут ответственность за переработку выпускаемой ими продукции. Необходимые средства на переработку выделяет государство (за счет сбора налогов с владельцев автомобилей и фирм-импортеров) и аккумулирует в специальных экологических фондах на местном и федеральном уровнях.

Утилизация транспортно-технологических машин (строительных, дорожных, подъемно-транспортных и других) имеет свои особенности и требует значительно больших затрат по сравнению с автотранспортными средствами. Это обусловлено их габаритами, многообразием конструкций машин, различиями в конструкциях агрегатов, механизмов и рабочего

оборудования (ковшей, рукоятей, стрел, отвалов, брусьев, рам, фрезерных и других барабанов и т.п.), а также наличием во многих машинах гусеничного ходового оборудования.

За последние годы утилизация после списания машин превратилась в наиболее важный в экологическом аспекте этап их полного жизненного цикла. Утилизация включает разборку машины, сортировку материалов, деталей и конструкций, дефектацию деталей и конструкций, а также последующую переработку пригодных для этого списанных элементов и материалов.

Отметим очень жесткие требования по эффективности утилизации машин в цивилизованном мире. В Евросоюзе уже несколько лет машины должны утилизироваться не менее чем на 95 мас. % путем рециклинга материалов и повторного использования отдельных деталей, а также сжигания отходов (с регенерацией энергии). При этом на повторное использование должно идти не менее 85 % массы машины, только 10 % могут быть термически переработаны (т.е. превращены в энергию) и всего 5 % могут подлежать захоронению.

В США переработка отходов во вторичное сырье становится самым дешевым способом их утилизации, поскольку организация новых открытых свалок запрещена, а захоронение и сжигание отходов с учетом соблюдения всех экологических норм обходится в три раза дороже, чем их переработка.

Между тем номенклатура материалов, используемых в продукции машиностроения, включает черные и цветные металлы и сплавы, различные виды полимеров и композиционных материалов на их основе, резину и дерево, клеи и герметики, лакокрасочные материалы и керамику. Каждый из них требует учета состава материала, его строения, структуры и свойств.

В этой сфере, помимо русскоязычных терминов «переработка вторичного сырья» или «вторичная переработка отходов», часто используют такие понятия, как «утилизация отходов» (от лат. *utilis* – полезный, *utilitas* – польза), а также одинаковые по смыслу «ресайклинг» или «рециклинг» (от англ. *recycling, to recycle* – переработать), которые также обозначают переработку и повторное использование отходов. В дальнейшем будем пользоваться термином «рециклинг» со всеми его производными. В свою очередь от *рециклинга* появились такие понятия, как рециклируемый и рециклированный материалы.

Рециклируемым называют материал, который частично или полностью может быть использован в качестве вторичного сырья, *рециклированным* – материал, который частично или полностью состоит из вторично использованного сырья (менее благозвучное название этого материала – *рециклят*).

За рубежом в развитых странах утилизация машин имеет разветвленную инфраструктуру, которая включает пункты приема машин, не пригодных к эксплуатации; предприятия демонтажа и разборки, где производятся сбор технических жидкостей, масел и остатков топлива, снятие деталей для по-

вторного использования, демонтаж габаритных полимерных деталей, колес и др.; шредерные заводы, на которых осуществляют измельчение, снятие красок и разделение отходов на тяжелые (черные и цветные металлы) и легкие фракции (пластмассы, стекло, ткани и др.); предприятия по утилизации отходов транспортного комплекса (отработанных аккумуляторов, изношенных шин, технических жидкостей, масел и др.); предприятия по переработке (металлургические заводы, химические производства и т.п.); торговые организации по реализации запасных частей и продуктов переработки транспортных средств; сеть площадок под захоронения отходов перерабатывающих предприятий.

Эффективность утилизации машины по окончании срока ее эксплуатации и списания является основой мероприятий по обеспечению ресурсосбережения и экологической безопасности на всех этапах жизненного цикла.

На этапе проектирования и конструирования оценивают возможности переработки используемых материалов и конструкций; разрабатывают блочно-модульные системы для упрощения разборки и замены узлов с повторным использованием отдельных узлов машины после их восстановления; komponуют конструкцию для удобного разделения различных по природе материалов; подбирают материалы, не требующие дополнительной обработки поверхности деталей; планируют применение рециклированных и рециклируемых материалов; разрабатывают дизайн машины, снижающий ее отрицательное влияние на окружающую среду.

На этапе изготовления совершенствуют технологические процессы изготовления деталей с целью минимизации образования отходов и их повторного использования; расширяют применение унифицированных и стандартных узлов и деталей; развивают принципы агрегатирования основных узлов и механизмов машин, упрощающие их обслуживание, ремонт и утилизацию; используют переработанные материалы и существующие технологии по переработке вторичных материалов.

На этапе эксплуатации руководствуются требованиями отечественных и международных стандартов по безопасной эксплуатации машин и охране окружающей среды; внедряют методы управления рабочим циклом машин с применением спутниковых систем; устраняют капитальные ремонты и заменяют восстановительные ремонты комплектацией машин сменными узлами; упрощают обслуживание машин, конструируя механизмы в виде самообслуживающихся агрегатов.

На этапе списания и утилизации разрабатывают и реализуют систему сбора и переработки списанных машин, их агрегатов, узлов и деталей, а также рециклинг материалов.

Однако утилизация машин не ограничивается только конечным этапом их жизненного цикла. Согласно стандарту СТБ 1218–2000 «Разработка и постановка продукции на производство» утилизировать необходимо не только

машины (т.е. составляющие их агрегаты, сборочные единицы, детали и конструкции, а также разнородные материалы), но и отходы, образующиеся на всех предшествующих этапах. На этапе разработки проектно-конструкторской документации – это отработанные модели и макеты, расходные материалы и отработавшие свой ресурс комплектующие изделия; на этапе производства – бракованная продукция и комплектующие изделия, отходы производства, а также оснастка, оборудование и инструмент, отработавшие свой ресурс; на этапе эксплуатации – снятые с эксплуатации дефектные машины, их агрегаты, узлы и детали, отработанные эксплуатационные материалы и т.п.

Ликвидационная стоимость машины (т.е. деталей и конструкций, не годных к дальнейшему использованию) практически равна стоимости бывших в употреблении материалов, из которых изготовлены эти детали и конструкции. Чтобы их вторичная переработка была рентабельной, необходимо выбрать такие компоненты, составы и технологию переработки, чтобы стоимость изделий из вторичного продукта не превышала стоимости изделий из первичных материалов.

Различают отходы производства и отходы потребления. *Отходы производства* – это остатки сырья и материалов, образовавшиеся при производстве машиностроительной продукции и частично утратившие исходные потребительские свойства; *отходы потребления* – это изделия (детали, узлы и конструкции машин) и материалы (использованные для отделки машин), частично или полностью утратившие свои потребительские свойства в результате физического старения.

Следует отметить, что в настоящее время имеется три основных направления обработки отходов: захоронение, сжигание и переработка. Выбор и реализация метода устранения отходов зависят от уровня развития предприятий по выпуску машиностроительной продукции и сопутствующих им производств по переработке отходов.

Захоронение является одним из наиболее распространенных методов обработки отходов для стран с малоразвитой системой их утилизации. Это обусловлено экономическими причинами: захоронение отходов обходится производителям на порядок дешевле их утилизации. В частности, в РФ захоронение оценивают (в российских рублях) в среднем в 300 руб./т, сортировку отходов – в 1200 руб./т, а утилизацию – в 3000 руб./т. Между тем в указанной стоимости захоронения в странах СНГ не учитывают затраты на проектирование и строительство инженерных сооружений и рекультивацию земель, которые должны обеспечить безопасность этих захоронений. В экономически развитых странах все это рассчитывают, поэтому от захоронения отходов там практически отказались, увеличив объемы их утилизации и сжигания.

Сжигание отходов является наиболее эффективным способом обезвреживания и утилизации бытовых и промышленных отходов во всех агрегат-

ных состояниях (в твердом, жидком и газообразном). Только в странах ЕС сжигается 20–25 % твердых бытовых отходов, для чего используют более 400 мусоросжигательных заводов с годовой производительностью от 60000 до 500000 т. При этом современные технологии сжигания отходов и очистки выбросов от токсичных веществ позволяют снизить риски загрязнения окружающей среды до уровня, который разрешен европейским законодательством. Что касается твердых промышленных отходов, то их перерабатывают сжиганием только в тех случаях, когда их невозможно или нерентабельно перерабатывать другими методами.

Строго говоря, сжигание, захоронение и другие способы уничтожения отходов утилизацией не являются, что отмечено в упомянутом стандарте СТБ 1218–2000.

Переработка вторичного сырья обеспечивает значительное сокращение материальных, энергетических и трудовых затрат на производство продукции машиностроения. Во многих странах сформирована самостоятельная и очень эффективная отрасль промышленности, располагающая наукоемкими технологиями и прогрессивным оборудованием, – переработка отходов производства и потребления. Предприятия по переработке вторичного сырья располагают оборудованием для оценки пригодности к рециклированию материалов, методами и средствами для идентификации и рассортировки материалов, а также основным оборудованием для экологически безопасной переработки вторичного сырья. Организация и развитие производства по промышленной переработке вторсырья черных, цветных и редких металлов является весьма актуальной задачей для Беларуси вследствие наличия развитой инфраструктуры различных отраслей машиностроения, требующих импорта многих металлов и сплавов.

Вполне очевидно, что наибольший интерес для нас представляют отходы потребления, а именно отходы продукции машиностроения, т.е. списанные машины и оборудование. Их детали, узлы и агрегаты классифицируют на две основные группы:

- изделия из металлических (черных металлов и сплавов, цветных металлов и сплавов) материалов;
- изделия из неметаллических (органических и неорганических) материалов.

Утилизация автотранспортных средств, строительной и дорожной техники имеет существенные отличия, которые зависят от особенностей конструкции и типоразмера машины. В общем случае утилизация включает следующие этапы:

- демонтаж всех съемных деталей и комплектующих, в том числе отдельно экологически опасных компонентов;
- сортировка снятых деталей по степени износа (годные к дальнейшему употреблению в виде запасных частей, годные к восстановлению и годные к утилизации);

- извлечение старых аккумуляторов для рециклинга;
- демонтаж старых шин для переработки;
- извлечение токсичных и взрывоопасных жидкостей;
- демонтаж и утилизация деталей из полимеров и композитов на их основе;
- дробление оставшихся корпусных, каркасных и других крупногабаритных элементов;
- сортировка материалов по группам: черные и цветные металлы, легкие неметаллические отходы (пластмассы, резина, стекло, керамика, дерево, картон, текстиль и др.) и шины;
- переплавка металла для получения очищенного сырья;
- переработка неметаллических отходов и шин.

В современной среднестатистической продукции машиностроения (машине) по разным оценкам доля металлов и сплавов превышает 60–70 % ее конструктивной массы, доля полимерных материалов составляет 10–20 мас. % (включая шины пневмоколесного ходового оборудования) и все более увеличивается за счет замены металлов. Например, в автомобиле фирмы «Volkswagen» (массой 1200 кг) более половины его массы приходится на долю черных металлов и сплавов, цветных металлов и легких сплавов – 170 кг, полимерных материалов – более 120, резины – 90, стекла – 50 кг. Из цветных металлов и сплавов в основном используют *алюминий* (в моторном блоке, головках цилиндров, корпусе коробки передач и др.), *латунь* (в радиаторе, водяном насосе, системе отопления и др.), *медь* (в стартере, генераторе, катушке зажигания, в электромоторах вентилятора, стеклоочистителя и др.), *цинк* (в корпусах навесных деталей двигателя, ручках и рукоятках, деталях замков и др.).

Материалы списанных металлоизделий (деталей и конструкций машин) – это наиболее ценные виды отходов, поскольку являются конечным продуктом металлургических процессов. Более того, по экспертным оценкам утилизация и рециклинг одной среднестатистической машины сберегают 1200 кг руды и 600 кг угля.

Вторичное сырье разделяют на *черные, цветные и редкие металлы*.

Технологический процесс переработки любого металлолома состоит из двух основных этапов: дometаллургической подготовки сырья и металлургического передела. При этом часть металлов (например, покрытия) рассеивается по технологическим причинам. На этапе подготовки сырья производится сортировка лома по классам и группам, что в дальнейшем упрощает выплавку сплава нужного химического состава. В соответствии с этим на втором этапе выбирают технологию плавки и плавильное оборудование для ее осуществления.

По форме потребления металлов различают чистые металлы, сплавы и химические соединения. Чистые металлы в основном используют в

качестве покрытий различного назначения, а сплавы представляют собой основную форму производственного потребления. Переработка и использование черного металлолома на порядок снижает энерго- и трудозатраты производства стали по сравнению с получением металла из руды. В настоящее время большая часть стали и других сплавов перерабатывается из вторсырья.

Утилизация металлического вторсырья должна обеспечить получение металлов и сплавов, не уступающих по свойствам первичным материалам. При этом переработка металлических отходов может производиться многократно без существенного ухудшения потребительских свойств деталей и конструкций из них.

Утилизация полимерного вторсырья является значительно более сложным процессом, что обусловлено рядом причин. Во-первых, переработка полимеров сопровождается их деструкцией (термической, физико-химической или механической), что вызывает значительное снижение свойств переработанного продукта; во-вторых, из-за высокой химической стойкости большинства полимеров необходимы дорогостоящие физико-химические методы их утилизации; в-третьих, в каждой единице техники применяют до десяти различных полимеров, каждый из которых требует своего подхода к переработке, что еще более усложняет их утилизацию.

В свое время активно велись исследования в области создания саморазрушающихся полимеров, в частности, био-, фото- и водоразлагаемых полимеров. Однако это направление не получило развития из-за значительных трудностей в реализации одновременно высоких физико-механических характеристик, способности к быстрому разрушению и низкой стоимости полимерных материалов.

Полимерные материалы, которые используют для изготовления деталей машин, классифицируют по следующим основным признакам:

- 1) *по типу полимерной матрицы* – термопластичные и терморезистивные;
- 2) *по наличию наполнителей* – армированные и неармированные;
- 3) *по методу переработки* – захоронение, сжигание для получения энергии, разложение до мономеров путем пиролиза, переработка в полуфабрикаты и изделия.

Термопластичные полимеры, которые находят наибольшее применение, это в основном термопласты общетехнического назначения (полипропилен, полиэтилен, поливинилхлорид, полиуретан, полиэтилентерефталат и др.), конструкционные термопласты (поликарбонат, полиамид, полисульфон и др.), а также композиционные материалы на их основе. Спектр деталей и конструкций из полимеров и композитов на их основе весьма широк. В их числе такие изделия, как крупногабаритные детали внешнего и внутреннего интерьера (багажники, бамперы, внутренние пане-

ли дверей и крыш, дверные модули), топливные баки и баки для различных рабочих жидкостей, корпусные и каркасные детали системы отопления, обшивка и обивка салонов.

Термореактивные полимеры (ненасыщенные сложные полиэферы, эпоксидные, фенолформальдегидные, аминформальдегидные и кремнийорганические смолы) используют в основном в качестве матриц композитов на основе стекловолоконистых наполнителей. Из них изготавливают корпуса и кожухи для фильтров, насосов и моторов, кузовные наружные панели (бамперы, капоты, багажники, спойлеры, обтекатели, пороги, двери и др.). Все шире используют композиты на основе углеволоконистых армирующих наполнителей, которые существенно снижают массу строительных и дорожных машин, а также автотранспортных средств. В числе изделий из углепластиков крупногабаритные элементы внешнего интерьера, элементы тормозных систем, клапаны газораспределительных механизмов и др.

Самым простым является *способ сжигания* полимерных отходов для получения энергии. Сжиганием называют контролируемый процесс окисления отходов. Его используют в тех случаях, когда переработка полимерных отходов другими способами невозможна или экономически невыгодна. В частности, на топливо идут мелкие полимерные детали, разборка которых является трудоемким процессом.

Пиролиз состоит в термическом разложении полимерных отходов без доступа или с ограниченным доступом воздуха. В результате пиролиза отходы разлагаются до мономеров с образованием низкомолекулярных (жидких и газообразных) соединений. Этот способ требует специального оборудования и значительных энергетических и трудовых затрат. Процесс осуществляют в специальных установках (реакторах) при температурах от 450–550 °С (с максимальным образованием жидкого продукта и твердого остатка) до 900–1050 °С (минимальным выходом твердого и жидкого продукта, но с максимальным выходом пиролизного газа). У пиролизного газа, содержащего водород, оксид углерода и метан, теплота сгорания составляет всего 7–11 МДж/м³. Поэтому газ с таким уровнем теплотворной способности используют, как правило, на месте его производства или же на небольшом расстоянии (не более 3 км) от пиролизной установки.

Пиролиз используют в основном для переработки неармированных полимеров, а также полимерных смесей, когда не представляется возможным выделить отдельный полимер с достаточно высоким уровнем потребительских свойств. Утилизацию полимерных волоконистых композитов используют в основном для восстановления армирующего наполнителя, свойства которого после переработки зависят от параметров пиролиза. Воздействие на окружающую среду при пиролизе значительно меньше, чем при сжигании отходов.

Переработка полимерного вторсырья в материалы и изделия состоит в механическом рециклинге (т.е. в дроблении отходов) и последующих операциях с этими отходами. Выбор метода переработки деталей и конструкций машин, изготовленных из полимерных материалов, зависит от природы и состава полимера, а также от наличия армирующих компонентов. На полимерные детали, которые поддаются переработке, наносят специальную маркировку. В продукции машиностроения, в том числе в автотранспортных средствах, используют как *термопластичные*, так и *терморективные полимеры*.

Вторичная переработка термопластичных полимеров в большинстве случаев включает механический рециклинг, модифицирование (введение технологических и эксплуатационных добавок) и гранулирование. Переработка термопластов в изделия для использования в машиностроении пока не выходит за рамки лабораторных исследований или мелкосерийного производства. Такие вторичные технические термопласты как полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полиэтилентерефталат и др. находят применение в качестве запасных частей для автотранспортных средств и транспортно-технологических машин. Например, вторичный полиэтилен высокой плотности используют в стандартной шестислойной конструкции автомобильного топливного бака в качестве промежуточного слоя, не контактирующего с топливом. Из вторичного полипропилена изготавливают колпаки колес, бамперы и обтекатели, щитки и приборные панели, элементы системы кондиционирования воздуха и воздуховодов, обивку багажника и коврики, а также корпуса аккумуляторных батарей, из вторичного поливинилхлорида – брызговики. Вторичные полиэтилентерефталат, полипропилен и полиамид используют для производства ворса (толщиной до 2 мм) для рабочего оборудования (цилиндрических и лотковых щеток) подметально-уборочных машин.

Вторичная переработка терморективных полимеров связана со спецификой «сшитой» структуры их макромолекул, вследствие чего реактопласты не плавятся и не растворяются в органических растворителях. Поэтому их переработка включает в основном механическое дробление деталей и конструкций и последующее использование полученных полуфабрикатов в качестве наполнителей материалов для изделий пониженного качества, не связанных с машиностроением. Если такая переработка материалов является экономически невыгодной, их хоронят или сжигают для извлечения энергии как побочного продукта.

Помимо этих способов, имеются и другие химические и физико-химические способы утилизации, которые, однако, не выходят пока за рамки лабораторных исследований и опытных партий. Эти методы ориентированы на утилизацию и восстановление только армирующих наполнителей (углеволокна, стекловолокна или органического волокна). В их числе химические методы переработки армированных полимеров, основанные на депо-

лимеризации полимерного связующего и восстановлении армирующего волокнистого наполнителя (термокатализ, сольволиз и др.). В результате *термокатализа* происходит перевод органического связующего в газообразное состояние и сохранение армирующего наполнителя, в результате *сольволиза* образуются жидкая фракция связующего и восстановленные волокна наполнителя.

Таким образом, рециклирование полимерных отходов и особенно отходов композиционных материалов на полимерной матрице пока не позволяет получать изделия из них с высоким уровнем эксплуатационных свойств и использовать их по прежнему назначению. В большинстве случаев рециклированные полимерные отходы применяют для изготовления малоответственных изделий, не связанных с машиностроением.

Металлы и сплавы, из которых изготавливают детали и конструкции машин, – это полностью рециклируемые материалы. Кроме того, практически все металлоизделия (из черных металлов и сплавов) машин получены из рециклированных материалов, поскольку вторичная переработка металлоотходов потребления, сформированных в результате физического изнашивания или старения элементов машин, является обязательным звеном технологического процесса производства стали.

В Беларуси с 2012 г. функционирует указ Президента № 348 от 09.08.2011 «О мерах по организации сбора, хранения неэксплуатируемых транспортных средств и их последующей утилизации», в котором предусмотрен порядок сдачи на утилизацию автотранспортных средств. В настоящее время отечественная программа утилизации транспорта находится в стадии становления и опирается на зарубежный опыт, имеющий значительные достижения в этой области. В частности, в Евросоюзе ежегодно перерабатывается до 10 млн единиц автотранспортных средств и машин, в Японии ежегодно утилизируется более 5 млн машин.

Беларусь располагает развитой инфраструктурой машиностроения, включая автомобилестроение, тракторостроение, производство строительных и дорожных машин. Соответственно, имеются значительные резервы отработанных и списанных машин и механизмов, более полная переработка которых может дать значительный экономический и экологический эффект. В промышленных масштабах утилизируются детали и конструкции из черных металлов и сплавов, лом которых перерабатывают на Белорусском металлургическом заводе. Требования к черному металлолому регламентированы стандартом СТБ 2026–2010 «Металлы черные вторичные. Общие технические условия».

Переработка цветных металлов находится на стадии активных лабораторных исследований и отработки полученных результатов в производственных условиях. При сборе и переработке цветных металлов и сплавов руководствуются требованиями стандарта ГОСТ 1639–78 «Лом и отходы

цветных металлов и сплавов. Общие технические условия». В частности, накоплен опыт рециклинга алюминиевых сплавов, который позволяет получать вторичные сплавы, не уступающие по свойствам первичным аналогам.

Ведутся также интенсивные исследовательские работы по переработке и применению вторичных полимерных материалов.

Современное состояние отечественного машиностроения в области строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин характеризуется необходимостью существенного роста качества и потребительских свойств машин. Решение этих задач, а также проблем, связанных с ресурсосбережением и экологической безопасностью, отражено в планах отечественной концепции развития науки и техники. Во всех областях науки, отвечающих за создание конкурентоспособной мобильной техники, намечены важные организационные, конструкторские и технологические мероприятия, способствующие решению этих проблем.

Контрольные вопросы к разделу 12

1 Назовите количественные показатели утилизации машин и повторного использования материалов с учетом требований, предъявляемых к ведущим производителям машин.

2 Что такое рециклируемый и рециклированный материалы?

3 Назовите этапы утилизации машин.

4 В чем состоят различия рециклирования металлических сплавов и полимерных композитов?

5 Назовите основные этапы технологического процесса переработки металлолома.

6 Классифицируйте полимерные материалы, которые используют для изготовления деталей машин, по основным признакам.

7 Назовите основные методы переработки деталей из термопластов и реактопластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Армированные пластики / В. А. Бунаков [и др.]. – М. : Изд-во МАИ, 1997. – 404 с.
- 2 **Бобович, Б. Б.** Процессы и аппараты переработки отходов : учеб. пособие / Б. Б. Бобович. – М. : ФОРУМ, 2015. – 288 с.
- 3 **Баловнев, В. И.** Многоцелевые дорожно-строительные и технологические машины : учеб. пособие / В. И. Баловнев. – Омск: М. : Омский дом печати, 2006. – 320 с.
- 4 **Бойко, Н. И.** Ресурсосберегающие технологии ремонта транспортных средств металлополимерными композициями : монография / Н. И. Бойко, В. Е. Зиновьев. – М. : Маршрут, 2004. – 187 с.
- 5 **Витязь, П. А.** Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов. – Минск : Бел. наука, 2006. – 363 с.
- 6 **Данилов, В. А.** Технология производства и ремонта горных машин и оборудования / В. А. Данилов, В. Я. Прушак, Е. М. Найденышев. – Минск : Тэхналогія, 2007. – Т. 1. – 486 с.; Т. 2. – 491 с.
- 7 **Довгяло, В. А.** Машины для земляных работ. Практикум : учеб. пособие / В. А. Довгяло, А. М. Щемелев, Ю. А. Шебзухов. – Гомель : БелГУТ, 2016. – 391 с.
- 8 **Довгяло, В. А.** Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров / В. А. Довгяло, О. Р. Юркевич. – Минск : Навука і тэхніка, 1992. – 256 с.
- 9 **Домбровский, Н. Г.** Строительные машины. Ч. 2 / Н. Г. Домбровский, М. И. Гальперин. – М. : Высш. шк., 1985. – 224 с.
- 10 **Зорин, В. А.** Основы работоспособности технических систем : учеб. для вузов / В. А. Зорин. – М. : Академия, 2009. – 208 с.
- 11 **Ивашков, И. И.** Монтаж, эксплуатация и ремонт подъемно-транспортных машин : учеб. для вузов / И. И. Ивашков. – М. : Машиностроение, 1991. – 400 с.
- 12 **Кенько, В. М.** Неметаллические материалы. Методы обработки : учеб. пособие / В. М. Кенько. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 240 с.
- 13 **Кравченко, В. И.** Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюков, В. А. Струк ; под ред. В. А. Струка. – Минск : Тэхналогія, 2006. – 409 с.
- 14 **Максименко, А. Н.** Эксплуатация строительных и дорожных машин : учеб. для вузов / А. Н. Максименко. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.
- 15 **Материаловедение : учеб. для вузов / В. А. Струк [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2008. – 519 с.**
- 16 **Материаловедение : учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 648 с.**

- 17 Машиностроение : энцикл. В 40 т. Т. 4–9. Строительные, дорожные и коммунальные машины. Оборудование для производства строительных материалов / ред. совет : К. В. Фролов [и др.] ; под общ. ред. И. П. Ксеневича. – М. : Машиностроение, – 2005. – 736 с.
- 18 Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь [и др.]. – Минск : Бел. наука, 2011. – 527 с.
- 19 Наноструктурные материалы / под ред. Р. Ханника, А. Хилл. – М. : Техносфера, 2009. – 488 с.
- 20 Ремонт строительных, путевых и погрузочно-разгрузочных машин : учеб. для вузов / А. В. Каракулев [и др.]. – М. : Транспорт, 1988. – 303 с.
- 21 **Решетов, Д. Н.** Надежность машин / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. – М. : Высш. шк., 1988. – 238 с.
- 22 **Сидоров, А. И.** Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. – М. : Машиностроение, 1987. – 192 с.
- 23 Технические основы создания машин : учеб. пособие / В. А. Довгяло [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 330 с.
- 24 Технологические методы обеспечения надежности деталей машин : учеб. пособие / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Выш. шк., 2005. – 299 с.
- 25 Технология машиностроения : учеб. пособие / М. Ф. Пашкевич [и др.] ; под ред. М. Ф. Пашкевича. – Минск : Новое знание, 2008. – 478 с.
- 26 Технология машиностроения, производство и ремонт подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин : учеб. для вузов / Б. П. Долгополов [и др.] ; под ред. В. А. Зорина. – М. : Академия, 2010. – 576 с.
- 27 **Труханов, В. М.** Надежность изделий машиностроения. Теория и практика / В. М. Труханов. – М. : Машиностроение, 1996. – 336 с.
- 28 **Хасуи, А.** Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.
- 29 Эксплуатация дорожных машин : учеб. для вузов / А. М. Шейнин [и др.]. – М. : Транспорт, 1992. – 328 с.

Учебное издание

ДОВГЯЛО Владимир Александрович

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**

Учебник

Редактор *И. И. Эвентов*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Корректор *А. А. Павлюченкова*

Подписано в печать 14.06.2018 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 21,86. Уч.-изд. л. 24,11 . Тираж 100 экз.
Зак. № 773. Изд. № 8.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014.

№ 2/104 от 01.04.2014.

№ 3/1583 от 14.11.2017.

Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель