

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

Кафедра «Детали машин, путевые и строительные машины»

В. А. ДОВГЯЛО

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений
по специальности
«Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных, путевых,
дорожно-строительных машин и оборудования»*

Гомель 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1 Показатели качества и технического уровня машин.....	7
2 Работоспособность машин.....	10
2.1 Показатели надежности.....	10
2.2 Основные факторы физического старения машин.....	16
2.3 Усталостное разрушение деталей и конструкций.....	19
2.4 Изнашивание деталей в узлах трения.....	22
2.5 Коррозионное разрушение деталей и конструкций.....	27
3 Методология обеспечения работоспособности машин при проектировании.....	31
3.1 Этапы создания машин.....	33
3.2 Общие правила и методика ресурсосберегающего конструирования.....	38
3.3 Расширенное применение унификации, агрегатирования и блочно-модульной компоновки.....	43
3.4 Экологические приоритеты при проектировании и конструировании.....	52
4 Выбор конструкционных и триботехнических материалов, обеспечивающих ресурсосбережение.....	56
4.1 Материалы со стабильными свойствами для основных деталей и конструкций строительных и дорожных машин.....	57
4.2 Износостойкие материалы для рабочих органов машин для земляных работ.....	63
4.3 Многофункциональные композиционные материалы с комплексом особых свойств.....	68
4.4 Ленточные антифрикционные материалы для тяжелонагруженных узлов трения.....	84
4.5 Наноматериалы и нанотехнологии.....	86
4.6 Адаптивные материалы и конструкции.....	89
5 Ресурсосберегающие мероприятия по обеспечению работоспособности машин при их изготовлении.....	93
5.1 Основные направления повышения надежности на этапе изготовления.....	93
5.2 Технологическая рациональность конструктивных решений.....	93
5.3 Специализация производства и типизация производственных процессов при изготовлении деталей.....	101
5.4 Обеспечение точности размеров и качества поверхности деталей при механической обработке.....	114
5.5 Термическая, химико-термическая и термомеханическая обработка деталей.....	121

5.6	Обеспечение требуемого качества сборки узлов и агрегатов.....	137
5.7	Методы снижения напряжений в деталях и конструкциях.....	141
6	Обеспечение работоспособности машин при эксплуатации.....	145
6.1	Основные направления повышения надежности на этапе эксплуатации.....	146
6.2	Совершенствование организации технического обслуживания и ремонта машин.....	147
6.3	Дефектация деталей.....	155
6.4	Восстановление деталей. Классификация основных методов.....	162
7	Методы восстановления деталей наплавкой металлических слоев.....	166
7.1	Газотермическая (газопламенная) наплавка.....	168
7.2	Электротермическая наплавка.....	170
8	Методы восстановления деталей с помощью металлических покрытий.....	182
8.1	Газотермическое (газопламенное) напыление.....	186
8.2	Способы электротермического напыления.....	187
8.3	Нанесение электролитических покрытий.....	193
9	Способы восстановления посадки между сопряженными поверхностями деталей.....	199
10	Методы восстановления деталей, основанные на пластическом деформировании материала.....	205
11	Методы восстановления деталей с использованием синтетических материалов.....	210
11.1	Восстановление деталей с применением клеевых материалов и композиций.....	210
11.2	Восстановление деталей с применением герметиков (анаэробных материалов).....	215
11.3	Восстановление деталей с помощью полимерных покрытий.....	217
	Заключение.....	228
	Список литературы.....	230

Работоспособность машины называют ее способность выполнять заданные функции и сохранять свои параметры в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Нормативно-техническая база строительных, дорожных и любых других машин – это постоянно изменяющийся и совершенствующийся комплекс требований, который охватывает социальные, технико-экономические, конструктивные, технологические, эксплуатационные и иные аспекты.

К числу основных современных документов, регламентирующих упомянутые требования к машинам, относятся международные стандарты ИСО 14000 «Система экологического управления». Они дают оценку экологической безопасности машин, которая является решающей при выявлении их конкурентоспособности.

В суверенной Беларуси 90 % прироста ВВП обеспечивается интенсивными факторами производства (для сравнения – в БССР этот показатель составлял всего 50 %). Вполне очевидно, что свой вклад вносит и отечественное машиностроение. Однако только 1/4 прироста использования передовых технологий (по данным Госкомстата) дает отечественная наука, что свидетельствует о больших резервах нашего научно-производственного комплекса. Более того, несмотря на ежегодное снижение энергоемкости ВВП более чем на 4 %, продукция отечественного машиностроения по-прежнему имеет завышенные удельные показатели энерго- и материалоемкости. Поэтому производство строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин и оборудования в нашей стране должно развиваться (и развивается) по пути снижения потребления материалов, энергии и сырья, а также уменьшения трудозатрат при производстве машин, что соответствует мировым тенденциям в машиностроении.

В целом жизненный цикл машины включает процессы ее создания и эксплуатации, в том числе маркетинг, т. е. изучение рынка потенциальных потребителей; научно-исследовательскую работу (в том числе патентную) по определению оптимальных показателей создаваемой машины; ее проектирование и конструирование, включая разработку проекта экспериментальной машины, ее изготовление и испытания, внесение изменений в конструкцию и проектирование серийного образца с последующими испытани-

ями; 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 работоспособности, и наконец, ее списание и утилизацию.

Обеспечение высокого уровня работоспособности машин в условиях все возрастающих запросов потребителей машиностроительной продукции, в том числе к безопасности, экологии и энергопотреблению машин, требует от отечественных производителей комплексного, системного подхода к задачам создания и функционирования машин. Этот подход апробирован ведущими производителями и основан на учете экологических приоритетов на всех стадиях полного жизненного цикла машин, начиная с проектирования и заканчивая их утилизацией.

При этом следует учитывать, что комплекс функциональных параметров и эксплуатационных характеристик машин закладывается при их проектировании и конструировании, реализуется при изготовлении и поддерживается при эксплуатации.

В данном пособии рассмотрены основные методы повышения работоспособности строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин на различных этапах их создания и функционирования, включая ресурсосберегающие технологии и мероприятия по обеспечению работоспособности при проектировании, изготовлении и эксплуатации машин.

Автор выражает глубокую благодарность В.Ю. Пацевой за помощь в подготовке рукописи пособия к изданию.

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ МАШИН

При выборе машин для определенного вида работ (земляных, дорожных, путевых и др.), при разработке или модернизации серийной конструкции, при определении конкурентоспособности машиностроительной продукции необходимо иметь представление о ее качестве, техническом и эксплуатационном уровне. Качество машины характеризуется широким спектром свойств, которые обуславливают ее пригодность удовлетворять требованиям потребителя.

К числу основных потребностей относятся обеспечение предельно возможной производительности и высокого качества работ при минимальной стоимости единицы продукции, сокращение трудо-, энерго- и материальных затрат при достижении современного уровня экологической безопасности дорожно-строительных работ и обеспечении надежной эксплуатации дорог. Поэтому машиностроение развивается по пути реализации все более жестких требований, предъявляемых к машинам современными технологиями строительства и эксплуатации дорог, с учетом достижений в области материаловедения и технологии металлов, автоматизации и компьютеризации проектирования, изготовления и эксплуатации дорожно-строительной техники.

В общем случае для оценки уровня продукции машиностроения, в том числе погрузочно-разгрузочных, путевых, дорожно-строительных машин и оборудования, используют Единую систему конструкторской документации (ЕСКД), составляя карту ее технического уровня и качества. Показатели, определяющие качество и эффективность машин, можно условно разделить на следующие группы:

- 1) технико-экономические, характеризующие эффективность машин по основным техническим параметрам (мощность, производительность, энерго- и материалоемкость, выработка и др.);
- 2) конструктивные, которые характеризуют качество и свойства конструкции машины (надежность, унификация и стандартизация элементов конструкции и др.);

3) эксплуатационные, характеризующие работу машины в производственных условиях (типоразмер, мобильность, проходимость, универсальность и др.);

4) технологические, которые характеризуют трудоемкость изготовления деталей и сборочных единиц, а также сборки и разборки машины.

Вполне очевидна неодинаковая роль отмеченных показателей в оценке качества и технического уровня машин. Профессор В.И. Баловнев с коллегами исследовал значимость более 30 показателей дорожно-строительных машин по коэффициенту их весомости на базе экспериментальных данных. Наибольший коэффициент весомости имеет надежность, что свидетельствует о ее роли в обеспечении работоспособности машин различного назначения.

В условиях рыночной экономики продукция отечественного машиностроения должна соответствовать мировому уровню или превосходить его. В качестве примера конкурентной борьбы за рынок показательной является информация об одноковшовых экскаваторах ведущих производителей Европы, Азии и США (таблица 1.1). Их основные параметры (масса и габаритные размеры экскаватора, мощность двигателя, вместимость ковша и параметры рабочей зоны, характеристики гидросистемы и механизмов хода и поворота) имеют очень высокие показатели и незначительно отличаются друг от друга. Машины обладают высоким уровнем экономичности, эргономичности и экологической безопасности. Практически все они снабжены энергосберегающими системами электронного управления, автоматически обеспечивающими оптимальное использование мощности двигателя для различных режимов 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. Поэтому выбор потребителем наиболее выгодной марки машины, в частности 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*. Помимо этого, большое значение имеют различные удельные технические и эксплуатационные показатели:

– *удельная материалоемкость (m/P_3) и удельная энергоемкость (N/P_3)*, а также обратные этим характеристикам показатели;

– *удельная производительность на единицу массы (P_3/m) и на единицу мощности (P_3/N)*, где m – масса машины, N – мощность силовой установки, P_3 – суточная эксплуатационная производительность.

Таблица 1.1 – Основные параметры гидравлических одноковшовых экскаваторов*

Параметр	АО «КЭБ», ЭО-4225А	ATLAS, 1704LC	CASE POCLAIN, 1288LC	CATERPILLAR, 325GM	DAEWOO, SOLAR 280LC	KOBELCO, SK300	KOMATSU, PC300	SAMSUNG, SE280	HITACHI, FH-270.3	HYUNDAI, ROBEX 290	KATO, HD 1250
Масса экскаватора, т	26,45	24,2	26,2	25,8	28	29,2	30,7	26,6	26	27	29,5
Мощность двигателя, кВт	125	125	127,6	125,1	141	169	154	132,5	122	145	161,9
Рабочее давление, МПа	28	32	35	32	30	30	32,5	32	28,5	32	28,5
Максимальная подача насоса, л/мин	400	630	585	420	500	630	500	520	524	514	582
Максимальное усилие резания, кН	149	172	184,5	149	174,3	201	175,3	166	154,9	167	173
Тяговое усилие, кН	210	200	197	216	263	270	234	240	214	267	197
Преодолеваемый уклон, град	35	35	38,7	35	35	35	35	35	35	35	35
Давление на грунт, МПа	0,054	0,05	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	4,6	5	5,5	5,5	4,4	4	4,6	5,5
Частота вращения поворотной платформы, мин ⁻¹	9,1	9	12,1	10,3	12,1	10,5	10	9,7	12	10,2	10
Вместимость ковша (СЕСЕ), м ³	1,11	1	1,24	1	1,1	1,2	1,2	1,1	0,9	1,1	1,2
Глубина копания, м	6	6,95	6,4	6,9	6,67	6,79	6,7	7	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, гусеничный ход, рабочее оборудование – обратная лопата.

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАШИН

Надежность 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 создания и функционирования машин. Уровень их надежности 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 режимом работы и условиями использования, 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, а при избыточной – снижается эффективность их использования и происходит перерасход ресурсов.

Таким образом, надежность характеризует способность машины сохранять работоспособность во времени и имеет следующие характеристики: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Безотказность – свойство машины непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки (т. е. продолжительности или объема работ) до отказа (или планового ТО).

Свойство безотказности проявляется в зависимости от назначения машины как при ее эксплуатации, так и в режиме ожидания работы.

Она характеризуется сопротивляемостью элементов конструкции разрушению, износу и коррозии, а также стабильностью и уровнем эксплуатационных свойств конструкционных и триботехнических материалов.

Для машин основное значение имеет продолжительность работы (в от-

работанных часах) или выполненный объем (число проходов, объем разработанного грунта и др.), поэтому время работы до отказа в этом случае называют *наработкой* на отказ, а регламентированное время работы машины – *ресурсом*.

Если причиной нарушения работоспособности являются коррозия, облучение, внешние температурные факторы, время работы до отказа оценивают календарной продолжительностью работы машины и называют *сроком службы до отказа*, а регламентированное время работы машины – *сроком службы*.

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

Предельное состояние машины – это состояние, при котором ее дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена по следующим причинам:

- 1) из-за неустранимого ухудшения требований безопасности;
- 2) из-за недопустимого ухудшения параметров по сравнению с заданными значениями;
- 3) из-за недопустимого снижения эффективности эксплуатации;
- 4) из-за необходимости проведения капитального ремонта.

За критерий предельного состояния можно принять признаки, которые характеризуют нарушение работоспособного состояния машины. Для машины в целом к ним относится необходимость:

- 1) ремонта или замены нескольких составных частей машины;
- 2) полной разборки машины, обусловленной повреждением базовой сборочной единицы (например, несущей рамной конструкции).

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

- 1) замены или трудоемкого ремонта корпусной детали;
- 2) замены или ремонта нескольких основных деталей;
- 3) 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 предельного состояния деталей является их замена, а машины (и ее узлов и агрегатов) – списание или капитальный ремонт.

В отличие от безотказности долговечность характеризует продолжительность работы машины по суммарной наработке, которая прерывается периодами для восстановления ее работоспособности в плановых и внеплановых ремонтах, а также при техническом обслуживании.

Ремонтпригодность – приспособленность машины к предупреждению

и обнаружению причин возникновения ее отказов (повреждений) и устранению их последствий путем ТО и ТР. Ремонтпригодность количественно характеризует компоновку машины (ее агрегатов и сборочных единиц), а также их доступность и съёмность при сборке и разборке.

Ремонтпригодность машин включает в себя следующие основные понятия:

- 1) доступность проведения осмотра и работ по регулировке и замене деталей;
- 2) контролепригодность (возможность контроля технического состояния элементов машин при профилактических мероприятиях, а также поиска отказавшего элемента или причины неисправности с помощью специальных методов и средств, в том числе диагностической аппаратуры);
- 3) легкосъёмность при замене сборочных единиц или агрегатов с минимальными затратами времени и труда;
- 4) взаимозаменяемость, которая характеризуется объемами пригоночных работ при установке однотипных элементов;
- 5) блочная или агрегатная компоновка, т. е. возможность демонтажа и монтажа агрегата без его предварительной разборки или смежного с ним узла;
- 6) степень унификации (использование однотипных деталей и сборочных единиц).

Сохраняемость – свойство машины непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в процессе хранения и транспортирования. Свойство сохраняемости характеризует способность машины противостоять отрицательному влиянию факторов ее длительного хранения и транспортирования, а также обеспечить после этого ее применение с заданными функциональными параметрами при сохранении показателей безотказности и долговечности.

Она характеризуется сопротивляемостью конструкций машины изменению характеристик материалов под воздействием влаги, облучения, а также загрязненности и температуры окружающей среды. Высокие показатели сохраняемости достигаются при использовании лакокрасочных и полимерных покрытий, герметиков и упаковочных пленок, специальных заглушек и пробок, установкой опорных приспособлений, хранением в ангарах и др.

Для различных машин эти показатели надежности имеют различную значимость. В частности, для машин, отказ которых может повлечь крупные убытки от простоев (краны и другие грузоподъемные машины), наиболее важным свойством является их безотказность, а для транспортирующих машин – ремонтпригодность, поскольку непродолжительные отказы существенно не влияют на их производительность.

Различают исправное, неисправное, работоспособное и неработоспособное состояния машин.

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 – неспособна 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, 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 работы (рисунок 2.1), на котором представлены периоды наработки, ремонта и технического обслуживания, т. е. периоды работоспособного и неработоспособного состояний машины. Они могут различаться по продолжительности и чередованию, что дает информацию о 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 длины участков $t_n + t_p$, $t_n + t_{то}$ растет долговечность машины.

Эффективность эксплуатации машины, в первую очередь, зависит от показателей надежности, которые характеризуют длительность периодов эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, а также затрат на поддержание работоспособного состояния при эксплуатации. Поэтому в качестве основных характеристик надежности целесообразно использовать: средний и гамма-процентный ресурсы до капитального ремонта или до списания; вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа или на отказ; интенсивность отказов или параметры потока отказов; среднее время восстановления работоспособного состояния; коэффициенты технического использования и готовности.

Из перечисленных характеристик к показателям надежности, присущим только восстанавливаемым элементам, следует отнести среднюю наработку на отказ, наработку между отказами, среднее время восстановления.

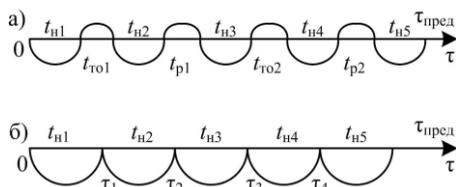


Рисунок 2.1 – Графики эксплуатации (а) и потока отказов элементов (б) машины:

t_{ni} – период времени наработки; t_{pi} – период времени ремонта при возникновении отказа; t_{toi} – период времени технического обслуживания; τ_i – моменты отказов; $\tau_{пред}$ – момент наступления предельного состояния

Долговечность машин и их элементов характеризуют ресурсные показатели. 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-процентным ресурсом T_j считается наработка, в течение которой машина не достигает предельного состояния с заданной вероятностью j процентов ($j, \%$), т. е. j (регламентированная вероятность) – это заданный процент машин, каждая из которых достигает установленного ресурса T_j . Он определяется по формуле

$$P(T_j) = \frac{j}{100}. \quad (2.2)$$

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

Нарботка на отказ – это отношение наработки восстанавливаемой машины к математическому ожиданию (среднему значению) числа ее отказов в период этой наработки. Статистическую наработку восстанавливаемых машин на отказ можно определить из формулы

$$T_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i, \quad (2.4)$$

где $\sum_{i=1}^{N_0} t_i$ – суммарная наработка восстанавливаемых машин;

N_0 – суммарное число их отказов.

Средняя наработка до отказа – это математическое ожидание (среднее значение) наработки до первого отказа. Эта характеристика невосстанавливаемых элементов соответствует показателю средней наработки на отказ восстанавливаемых элементов. 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 изделия;

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

N – общее число этих элементов.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это вероятность отказа невосстанавливаемого элемента, т. е. это число отказов Δn , происшедших в единицу времени Δt , начиная с момента времени t , отнесенное к числу элементов, работоспособных в этот момент. Статистическая оценка $\lambda(t)$ может быть выражена в виде

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

где N_p – число работоспособных элементов.

Как правило, для многих элементов машин зависимость интенсивности отказов (или опасности отказа) 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 заводом-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 усиленного старения – увеличивается интенсивность отказов вследствие износа, усталостного разрушения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией. Ресурс машины назначают, как правило, в конце второго – начале третьего этапа наработки.

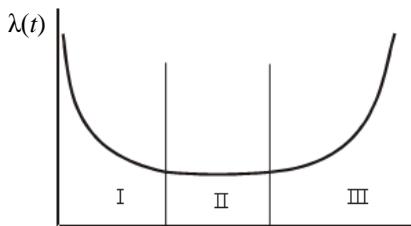


Рисунок 2.2 – Зависимость интенсивности отказов от времени наработки

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

$$T_{\text{в}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{\text{в}i}, \quad (2.6)$$

где N – общее число восстанавливаемых машин;

$t_{\text{в}i}$ – время восстановления i -й машины.

Помимо указанных единичных показателей используют комплексные показатели надежности машин. К их числу относятся коэффициенты технического использования и готовности.

Коэффициент технического использования $k_{\text{ти}}$ статистически определяют отношением суммарного времени пребывания машин в работоспособном состоянии к суммарному времени их эксплуатации, включающем периоды пребывания машины в работоспособном состоянии и периоды простоев:

$$k_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{р}} + t_{\text{то}}}, \quad (2.7)$$

где $t_{\text{н}}$ – суммарная наработка (пребывание в работоспособном состоянии) всех машин;

$t_{\text{р}}$ – суммарное время простоев при проведении плановых и внеплановых ремонтов всех машин;

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

Коэффициент готовности $k_{\text{г}}$ характеризует вероятность того, что машина окажется работоспособной в произвольный момент времени, кроме периодов выполнения планового технического обслуживания.

Статистически $k_{\text{г}}$ представляет собой отношение времени безотказной работы к сумме времени безотказной работы и времени простоя (за исключением периодов времени плановых ремонтов и технического обслуживания):

$$k_{\text{г}} = \frac{T_{\text{о}}}{T_{\text{о}} + T_{\text{в}}}, \quad (2.8)$$

где $T_{\text{о}}$ – среднее время безотказной работы (наработка на отказ);

$T_{\text{в}}$ – среднее время восстановления.

Из выражений (2.7) и (2.8) следует: чем меньше среднее время восстановления и суммарные простои, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом, тем выше $k_{\text{ти}}$ и $k_{\text{г}}$.

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

2) физическое старение, которое является результатом воздействия на машину и ее элементы 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 отказа машины в отличие от физического старения.

Именно физическое старение, обусловленное воздействием на машину 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.

Именно физическое старение способствовало возникновению ремонтного производства и сдерживается системой технического обслуживания и ремонта.

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 можно квалифицировать как 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.

Время, затрачиваемое на восстановление машины в условиях эксплуатации, принято называть *простоями*. Причины перехода машины в неработоспособное состояние могут быть самыми разными. Для облегчения их выявления и устранения причин возникновения отказы целесообразно классифицировать по ряду основных признаков: по критерию и причине возникновения, развитию и сложности устранения отказа.

По критерию отказы разделяют на функциональные и параметрические. *Функциональные отказы* приводят к частичному или полному прекращению выполнения функций машины в целом или ее элементов. Очень часто отказы функционирования связаны с разрушениями элементов (полотками, недопустимыми деформациями, увеличенным износом и др.).

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

По причине возникновения отказы разделяют на конструкционные, технологические и эксплуатационные. *Конструкционные отказы* могут быть обусловлены отказами 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 могут возникать на этапе изготовления машины из-за нарушения 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 могут быть связаны с нарушениями режимов работы или правил эксплуатации машины, например, с увеличенными нагрузками, превышающими установленные пределы, низким уровнем технического обслуживания, ошибочным выбором топливо-смазочных материалов. Кроме того, они могут быть следствием изнашивания.

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.

По условиям возникновения и развития отказы разделяют на внезапные и постепенные. Наиболее опасными для машины являются *внезапные отказы*, которые характеризуются резким ухудшением одного или нескольких параметров машины. Как правило, они возникают в результате случайного, внезапного воздействия внешних факторов, превышающих допускаемые нормы, или грубых нарушений условий эксплуатации (поломок, ударов, перегрузок). Вследствие этого элементы машины теряют свои свойства, необходимые для нормального функционирования машины, или же разрушаются.

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.

По сложности устранения отказов их можно разделить на отказы, *устраняемые при техническом обслуживании, в ходе текущего ремонта, при капитальном ремонте*. По данным профессора Каракулева А.В., 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.

Отказы приводят к частичной или полной потере работоспособности машины. Анализ причин их возникновения и понимание физической сущности отказов являются непременным условием обеспечения надежности 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 отказы*, вызванные мгновенным разрушением детали (действующие в детали или элементе конструкции напряжения превышают допускаемые напряжения, обусловленные пределом прочности или текучести материала детали); *постепенные отказы*, связанные с накоплением повреждений при многократно повторяющихся нагрузках, значения которых значительно ниже упомянутых выше статических нагрузок. Разрушение деталей и конструкций строительных, дорожных, подъемно-транспортных машин происходит, в основном, по механизму постепенного накопления повреждений при переменных внешних нагрузках, изменяющихся по величине и частоте воздействий, а разрушения, вызванные внезапными статическими нагрузками (обычно это аварийные ситуации, например, наезд машины на непреодолимое препятствие и др.), – значительно реже.

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.

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

Количественно усталостный процесс описывают зависимостью (рисунок 2.3), связывающей максимальное напряжение σ в материале детали при ее нагружении с числом циклов нагружения N (кривая Веллера). В качестве характеристики усталостной прочности принимают предел выносливости σ_{-1} (на графике σ_0), представляющий собой максимальное напряжение, которое может

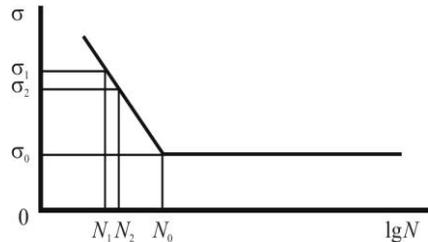


Рисунок 2.3 – Зависимость напряжений в материале детали от числа циклов нагружения

выдержать деталь без разрушения при длительной эксплуатации. Для большинства конструкционных материалов кривая усталости в полулогарифмических координатах имеет вид прямой с изломом.

Число N_0 (точка перелома кривой) называют базовым числом циклов ($N_0 = 10^7$). Если величина действующего напряжения σ_i не превышает предела выносливости, то она не оказывает разрушающего воздействия на деталь и не вызывает ее отказа. Наклонная (левая) часть кривой усталости аппроксимируется степенной зависимостью

$$\frac{N_i}{N_0} = \left(\frac{y_0}{y_i} \right)^m. \quad (2.9)$$

Эта зависимость позволяет определить разрушающее число циклов N_i (т. е. ограниченную долговечность) при напряжениях в детали σ_i , которые 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 ($m = 3 \dots 20$).

На рисунке 2.3 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 так называемых 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.

К основным факторам, определяющим выносливость детали или конструкции, относят: 1) конструктивные (наличие и количество концентраторов напряжений, масштабный фактор, форма поперечного сечения и др.); 2) технологические (структура металла, наличие объемных и поверхностных дефектов, шероховатость поверхности, поверхностное упрочнение); 3) эксплуатационные (режим и вид нагружения, характер нагрузки и др.).

Конструктивные особенности деталей в значительной степени влияют на их выносливость. С увеличением размеров детали ее выносливость, как правило, снижается. Вместе с тем масштабный фактор не оказывает влияния на угол наклона кривых усталости и положение их точки излома. Поэтому для определения пределов выносливости крупногабаритных деталей можно использовать результаты испытаний образцов из тех же материалов, моделирующих работу и повторяющих форму изделий.

Конструктивные *концентраторы напряжений* (резкое изменение формы, острые углы, резкие переходы и др.) также снижают показатели выносливости. Наиболее опасными местами деталей являются впадины зубьев и

резьб, галтели, шпоночные пазы и шлицы, поверхности с острыми углами. Для устранения их влияния изменяют форму детали за счет оптимизации конфигурации опасных сечений, по возможности устраняют 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, увеличивают радиусы закруглений.

Характеристики усталостной прочности реальных конструкций существенно отличаются от результатов испытаний на усталость образцов тех же материалов. Это обусловлено в основном действием концентраторов напряжений, возникающих в различных соединениях (сварных, заклепочных, резьбовых, прессовых). В сварных соединениях концентрация напряжений возможна в сварных швах из-за неоднородности металла (литейная структура шва, выгорание углерода и легирующих элементов) и в зонах соединения шва с основным металлом из-за структурных изменений в металле околошовной зоны, например, на границе закаленной и незакаленной областей сварных соединений. Это может вызвать значительное снижение предела выносливости сварных соединений – в 2–5 раз по сравнению с гладкими образцами из основного металла. К этому следует добавить отрицательное влияние остаточных внутренних напряжений, возникающих при сварке. В ряде случаев растягивающие остаточные напряжения в сварных соединениях могут на 50 % снизить их усталостную прочность. Кроме того, предел выносливости во многом зависит от качества выполнения сварки и значительно уменьшается из-за сварных дефектов (пор, непроваров, шлаковых включений и др.).

Существенное влияние на выносливость деталей и конструкций оказывают *структурная неоднородность металла*, а также наличие примесей, неметаллических включений, пор и других объемных дефектов, которые могут инициировать возникновение усталостных трещин и значительно (на порядок и более) снизить долговечность детали. Меньшее, но достаточно ощутимое влияние оказывает *качество поверхности*, в частности, ее *шероховатость*: поверхностные дефекты (царапины, задиры, риски и др.) на 30–40 % снижают выносливость детали.

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 2.4 представлены кривые усталости стальных образцов, которые были

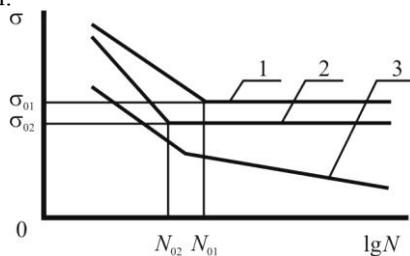


Рисунок 2.4 – Кривые усталости стальных (20Х) деталей, полученные при испытаниях в различных средах: 1 – на воздухе; 2 – в минеральном масле; 3 – в воде

испытаны на воздухе, в минеральном масле и воде. Видно, что даже масло, которое является химически инертной средой, оказывает отрицательное влияние на предел выносливости и базовое число циклов. Это явление обусловлено снижением выносливости из-за расклинивающего действия адсорбированного на поверхности образцов масла, которое ускоряет процесс развития поверхностных микротрещин (эффект Ребиндера).

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

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 сколь-

жения, 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.

Вместе с тем вид трения не является постоянной характеристикой узла трения. Даже для правильно сконструированного и изготовленного узла в зависимости от многих эксплуатационных факторов вид трения может меняться, и, как правило, 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 реборда колеса – боковая поверхность головки рельса.

Изнашивание происходит в местах фактического контакта трущихся поверхностей, 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* классифицирова-

ны, стандартизированы (ГОСТ 16429–70) и разделены на три основных 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 отношении твердости материала поверхностного слоя детали H_d к твердости частиц абразива $H_A - H_d/H_A < 0,5$.

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 распределителей 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 подповерхностных 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

строю 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 2.5 и 2.6.

Кривая 2 (см. рисунок 2.5) 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 со-

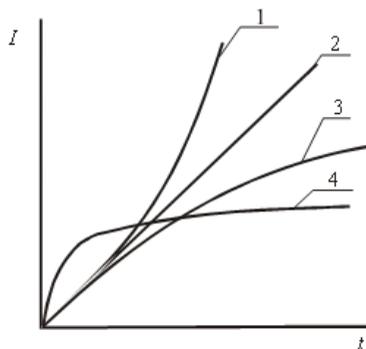


Рисунок 2.5 – Различные типы зависимости износа деталей от времени работы в узле трения

пряжение попадают все большие частицы абразива.

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

$$T = n \sqrt{I_{\text{пред}} / i}, \quad (2.10)$$

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

i – скорость изнашивания.

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

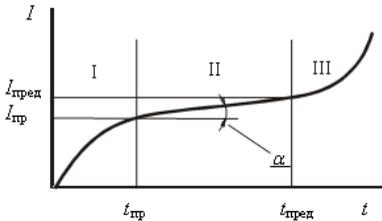


Рисунок 2.6 – Обобщенная зависимость износа от времени (кривая Лоренца)

И, наконец, наиболее *общая модель изнашивания* (кривая Лоренца), представленная на рисунке 2.6, 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 сопряжении, вызывая дополнительные динамические нагрузки и ухудшение условий смазывания трущихся поверхностей, а по достижении критической (предельной) величины износа возникают ударные нагрузки на детали, 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*

$$T = \frac{I_{\text{пред}} - I_{\text{пр}}}{i}, \quad (2.11)$$

где $i = \text{tg} \alpha$;

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

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

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 $f_i(t_i = Tf_i)$, то ресурс детали будет иметь вид

$$T = \frac{I_{\text{пред}}}{N} = \frac{I_{\text{пред}}}{\bar{i}}, \quad (2.12)$$
$$\sum_{i=1} f_i t_i$$

где f_i – относительная долговечность i -го цикла;

\bar{i} – средняя скорость изнашивания детали.

Как видно из выражения (2.12), 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

$$\frac{T_p}{T_a} = \frac{K_p}{K_a}, \quad (2.13)$$

где K_p и K_a – обобщенные коэффициенты рассчитываемой детали и аналога соответственно, $K_p = K_{p1}K_{p2}\dots K_{pn}$; $K_a = K_{a1}K_{a2}\dots K_{an}$;

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

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.

2.5 Коррозионное разрушение деталей и конструкций

Коррозией называют процесс постепенного разрушения материалов при их взаимодействии с окружающей средой. Разрушение металлических сплавов сопровождается возникновением химического соединения его компонентов с компонентами среды. Чаще всего продуктами такого взаимодействия являются оксиды металлов.

Коррозию классифицируют по следующим признакам:

- 1) по механизму взаимодействия материала со средой различают химическую и электрохимическую коррозию;
- 2) по типу коррозионной среды – газовую, атмосферную, жидкостную и

подземную коррозию;

3) *по условиям протекания коррозионного процесса* – структурную, контактную, щелевую, под механическим напряжением и фреттинг-коррозию;

4) *по виду коррозионного разрушения поверхности* металла – сплошную и местную коррозию.

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.

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 загрязнениями превращается в сильный электролит, вызывая электрохимическую коррозию этих поверхностей. При этом интенсивность коррозионного разрушения зависит от следующих факторов:

- 1) материала детали и метода улучшения ее поверхности;
- 2) состава воздуха, типа и количества загрязнений;
- 3) температуры и относительной влажности воздуха;
- 4) силовой нагрузки на деталь;
- 5) наличия лакокрасочного или другого защитного покрытия.

Как правило, для металлоконструкций машин, эксплуатирующихся на открытом воздухе, используют две основные группы материалов. Для корпусных и других изделий, не подвергающихся постоянным или циклическим нагрузкам, используют в основном конструкционные стали, защищенные от атмосферной коррозии лакокрасочными покрытиями. Для металлоконструкций кранов и других машин желательно использовать легированные нержавеющие стали, которые также защищают антикоррозионными покрытиями.

Состав воздуха 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 ускорении коррозии играют пылевидные твердые загрязнения, такие как угольная и песчаная пыль, соли и окислы металлов. Они способствуют ускорению капиллярной и химической конденсации вла-

ги из воздуха на поверхностях металлоконструкций.

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 относительными перемещениями в условиях окисления и схватывания.

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 следующие:

- 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 [12], что из-за коррозии в Союзном государстве России и Беларуси 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.

МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Процесс проектирования и конструирования начинают с анализа функций будущей машины и ее концептуального конструктивного решения (с учетом мирового опыта, уровня развития материалов и технологий). При этом важны и конструкция, и материалы, и технология изготовления (рисунок 3.1, а). Таким образом, выбор оптимального конструктивного решения должен учитывать особенности материалов и технологий, а также условия эксплуатации деталей и узлов машин.

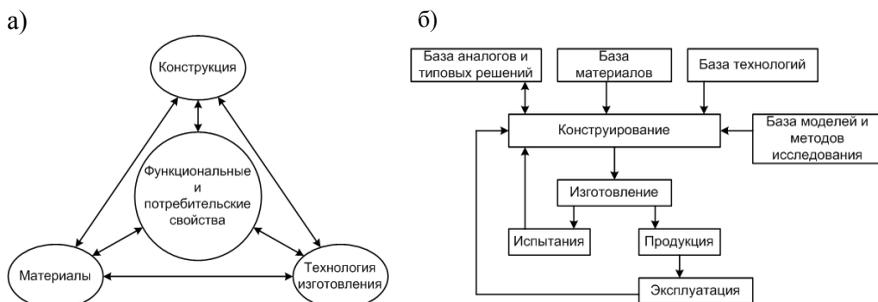


Рисунок 3.1 – Конструирование технических объектов

Функциональная целесообразность, т. е. принцип соответствия выбранного решения поставленной задаче, лежит в основе этого выбора (с учетом минимизации затрат и ресурсосбережения). 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 механизмов. 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, улучшен-

ные термической или химико-термической обработкой, а также углеродистые стали с тонкослойными покрытиями из сплавов, обеспечивающих увеличение их износостойкости и коррозионной стойкости, взамен дорогостоящих легированных сталей. В качестве конструкционных материалов несильных и малонагруженных конструкций следует шире 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 следует использовать вместо разъемных, в частности, соединения на основе термоактивных полимерных клеев предпочитают болтовым. Уплотнение неподвижных стыков целесообразно осуществлять с помощью анаэробных герметиков на основе терморезистивных полимеров, а не с помощью упругих прокладок. В качестве уплотнения подвижных соединений имеет смысл использовать разделительные уплотнения при ограниченных перемещениях или торцовые (осевые) при неограниченных перемещениях вместо соответственно скользящих или окружных скользящих уплотнениях.

При возможности выбора механизмов, их привода и узлов следует стремиться к упрощению структурных и кинематических схем и повышению эффективности работы механизмов, опираясь на принципы материало- и энергосбережения.

Например, механизмы и приводы вращательного движения предпочитают устройствам, в которых присутствует возвратно-вращательное 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 малоустойчивыми 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 и механизмов значительно эффективнее однопоточных последовательных систем. Кинематические схемы с разделением функций целесообразно использовать вместо совместной реализации различного вида движения или нагружения. Следует отдавать предпочтение схемам с независимой передачей движения или распределения нагрузки. Динамические или статические системы с коротким путем замыкания силовых линий (по количеству последовательно нагружаемых стыков, подвижных соединений и деформируемых звеньев) предпочитают системам с более длинным путем замыкания силовых линий,

системы с плавным изменением плотности или градиента плотности силовых линий – системам с резким изменением упомянутых параметров.

Системы, требующие регулировки или подгонки взаимного расположения звеньев, являются менее эффективными, чем системы звеньев, опор и подвески агрегатов, обеспечивающие их самоустановку. При этом самоустанавливаемость целесообразно решать за счет конструкции механизма, а не за счет системы управления.

Одним из наиболее важных аспектов конструирования является *преемственность* технических решений. Применение персональных компьютеров позволяет конструктору использовать прототипы из компьютерной базы. Укрупненно схема процесса конструирования представлена на рисунке 3.1, б. Кроме баз конструкций и комплексных решений, существуют базы материалов и технологий, а также базы данных об испытаниях и эксплуатации разработанных ранее конструкций. 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.

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, научно-технической и справочной литературы.

3.1 Этапы создания машин

Как уже отмечалось, жизненный цикл машины начинается зарождением идеи, 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.

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.

Успех технического творчества зависит от того, в какой мере проектировщики и конструкторы обладают достоверной информацией о требованиях, предъявляемых к продукции, производимой проектируемой машиной, о физической сущности выполняемых ею процессов, а также о состоянии развития технических возможностей изготовителей. В некоторых случаях для получения таких сведений необходима постановка специальных научных исследований.

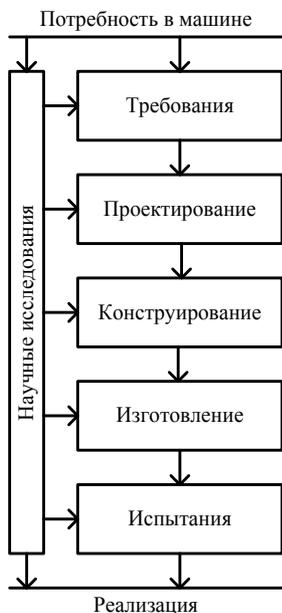


Рисунок 3.2 – Общая структура процесса создания машины

Необходимость выполнения перечисленных этапов устанавливается техническим заданием. В целом последовательность процесса создания машины показана на рисунке 3.3.

Техническое предложение – этап предварительного проектирования, характеризующийся активизацией творческого мышления, большим количеством идей и возможных вариантов их воплощения. На этой стадии особенно важна научно-техническая и патентная информация.

Техническое предложение предусматривает предварительную конструкторскую проработку и анализ различных вариантов, подбор материалов для выявления уточненных требований к машине. Варианты анализируют по основным показателям качества (надежности, экономическим, эргономическим) и технологичности (удельной трудоемкости изготовления, удельной энергоемкости и др.), а также по уровню стандартизации и унификации.

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 техническим системам, предназначенным для дальнейшего развития соответствующих отраслей техники; внедрение новых технологических принципов, повышающих качество продукции и обеспечивающих снижение материало-, энерго- и трудозатрат при изготовлении; разработку методов рационального применения и содержания машин. От технической идеи и соответствующей заявки заказчика разработчику на создание машины до ее введения в эксплуатацию необходимо выполнить большой объем работ. В их числе поэтапная разработка конструкторской документации (по ГОСТ 2.103-68):

- 1) техническое предложение;
- 2) эскизный проект;
- 3) технический проект;
- 4) рабочая конструкторская документация.

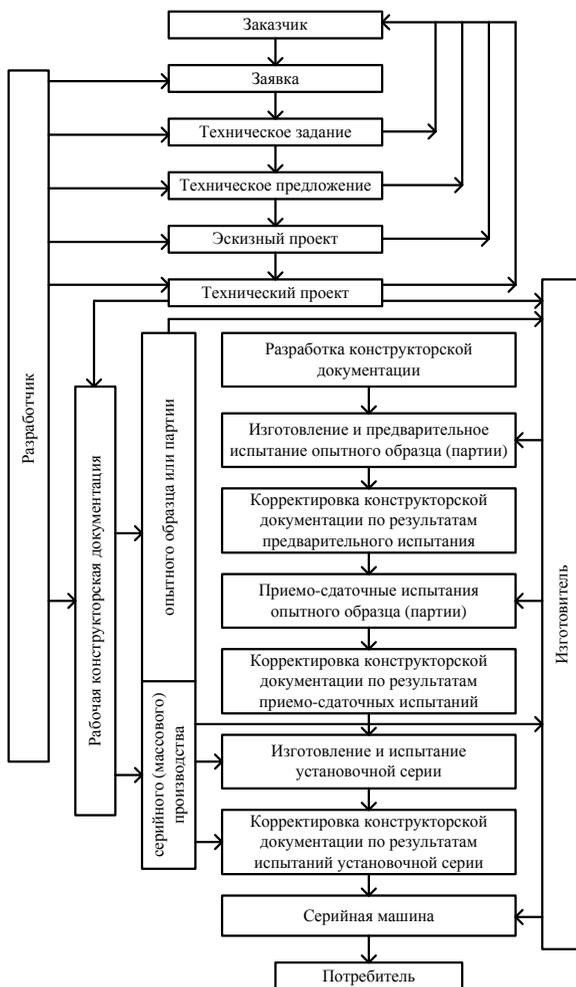


Рисунок 3.3 – Последовательность процесса создания машины

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

Эскизный проект – этап опытно-конструкторской разработки наиболее общих решений машины, позволяющих определить принцип ее работы. Прорабатывают различные варианты компоновки машины в целом, а также ее составных частей. Глубина проработки должна быть достаточной для сравнительного анализа по показателям качества машины с учетом ее конструктивных и эксплуатационных особенностей. Разрабатываемые вариан-

ты 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.

На стадии эскизного проекта работы, выполненные при разработке технического предложения, отражаются 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.

Очень важной работой на этапе эскизного проектирования является приближенное (по укрупненным показателям с применением моделирования) определение параметров машины (ее массы и габаритных размеров, 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 геометрически подобных (схожих) систем связаны между собой простыми соотношениями. Для машин этот метод (его сущность) выглядит следующим образом:

при подобных конструктивной и кинематической схемах (двух) машин одинакового назначения их параметры связаны следующими соотношениями:

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

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

На основании этих соотношений можно получить формулы вида

$$A_1 \approx A_2 \sqrt[3]{\frac{m_2}{m_1}} \approx K_p A_2,$$

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 (вместимость ковша) с другими параметрами. Помимо этого, составлены простейшие эмпирические зависимости, позволяющие с учетом различных коэффициентов найти практически любой габаритный или рабочий размер ОЭ.

Технический проект предусматривает разработку комплекса конструкторских документов, которые содержат окончательные технические решения по разрабатываемой машине: соответствие проекта требованиям технического задания, степень сложности изготовления, правила эксплуатации и ремонта машины.

При подготовке технического проекта осуществляют разработку конструкций машины и ее основных составных частей, расчеты (в том числе технико-экономические), анализ технологичности конструкции (с учетом конкретных условий завода-изготовителя), мероприятия по обеспечению заданного уровня стандартизации и унификации, проверку патентной чистоты. Габаритные, установочные и присоединительные размеры машины, а также возможности ее транспортирования и монтажа согласовывают с основным потребителем.

Если для изготовления отдельных оригинальных деталей нужно разработать 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 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, контролируют наличие сборочных баз.

После того как проектная и конструкторская техническая документация разработана и проконтролирована, приступают к изготовлению машины.

На первом этапе создают опытный образец (или опытную партию машин) и производят предварительные заводские испытания, в процессе которых отработывают рациональные эксплуатационные режимы, выявляют необходимость внесения каких-либо 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 устанавливают соответствие продукции разработанной технической документации и возможность постановки машины на производство (с участием разработчика, изготовителя и заказчика).

На втором этапе изготавливают серию машин и поставляют ее потребителю.

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. К ним следует отнести безопасность и надежность, экологию и эргономику, энерго- и материалоемкость, а также технологичность.

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.

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.

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.

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, приспособливающиеся 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 лакокрасочных 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.

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, минимизирующими 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 предполагает определение технологических функций машины, выявление особенностей ее работы, рассмотрение различных вариантов принципиальной схемы и выбор решения, компоновку машины и разработку общих видов и необходимых схем. *Конструирование* является последующей частью проектирования, в ходе которой определяется конструкция машины. Таким образом, конструирование обеспечивает более частные требования к машине. Изображая машину в виде «черного ящика», имеющего «вход» и «выход», можно считать, что проектирование – это выбор типа «черного ящика», а конструирование – его поэлементное расчленение.

Разработка общей концепции будущей машины базируется на научно-технических прогнозах. Методы прогнозирования основываются на профессиональном опыте, объективном анализе возможностей производства и сырьевой базы, предвидении перспектив развития данной отрасли машиностроения.

Выбору параметров машины должно предшествовать полное исследование всех факторов, определяющих ее конкурентоспособность. Необходимо изучить опыт зарубежных и отечественных производителей машин, провести сравнительный анализ их достоинств и недостатков, выявить особенности конструкции и эксплуатации, выбрать эффективные аналоги и прототип, выяснить тенденции развития и потребности соответствующей отрасли машиностроения.

Важным условием рационального проектирования является наличие фонда справочного конструкторского материала. Конструктор должен быть в курсе поисковых и перспективных работ, проводимых научно-исследовательскими институтами в отрасли строительного, дорожного, подъемно-транспортного машиностроения, углубленно и систематически изучать отечественную и зарубежную научно-техническую и патентную литературу. Наряду с этим следует использовать эффективные разработки и новые технические решения смежных отраслей машиностроения. Это расширяет кругозор и обогащает арсенал конструкторских средств. Весьма полезно изучать опыт наукоемких отраслей машиностроения (например, авиационной и космической техники), где высокие требования к качеству продукции обуславливают создание новых конструкций, эффективных способов повышения прочности, надежности и методов высокопроизводительного изготовления.

Конструктивная преемственность не означает ограничения творческой инициативы. Процесс постоянного совершенствования машин под влиянием возрастающих требований потребителя машиностроительной продукции должен находить отражение в выработке конструкторского мышления. Конструктор должен непрерывно обогащать и пополнять свой банк конструктивных решений, уметь анализировать и выявлять интересные кон-

структивные решения в любой машине. Он обязан знать новые материалы и современные технологические процессы, в противном случае он будет стеснен в выборе рациональных форм деталей и не сможет заложить в конструкцию современную технологию ее изготовления.

Развитие машиностроения неразрывно связано с развитием отраслей народного хозяйства, являющихся потребителями машин. В промышленности происходит процесс непрерывного совершенствования, при этом растет объем продукции, сокращается производственный цикл, появляются новые технологические процессы и повышается уровень механизации и автоматизации производства. Как следствие, возрастают требования к техническим характеристикам машин, а также возникает необходимость создания новых машин или модернизации существующих.

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.

Системный анализ, используемый в процессе создания принципиальной схемы машины, позволяет учитывать взаимосвязи элементов машины, а также работу машины в системе «машина – технология работ – окружающая среда – оператор». 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 преемственность аналогов предполагает не копирование, 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 от группы компетентных лиц (специалистов в смежных областях техники). По конкретной задаче высказанные идеи взаимно обогащаются и совершенствуются. Их фиксируют, классифицируют по направлениям и рассматри-

вают 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 более четко выбрать решение. Результатом поискового проектирования может быть усовершенствованная ранее известная модель либо принципиально новый вариант решения. Окончательный выбор принципиальной схемы определяет основные свойства машины.

3.3 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.

Как отмечалось, *стандартизацией* является деятельность по установлению технических требований (норм, правил) к объектам для их многократного применения при решении постоянно 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.

Важным аспектом стандартизации является комплексный подход к проблемам создания и функционирования машин. Он реализуется 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, резьб и других конструктивных элементов, систему обозначений и кодирования. О значимости стандартизации на этой стадии свидетельствуют отечественный и зарубежный опыт: до 60–70 % брака изделий машиностроения

связано с просчетами при проектировании и конструировании, а также отклонениями от требований и правил нормативно-технической документации.

На *стадии производства* установлена единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП, ЕСТД), регламентированы методы испытаний опытных образцов. Выпуск продукции осуществляется 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 эксплуатации (стандарты на системы технического обслуживания и ремонта); 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, как уже отмечалось, – 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.

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

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

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

Типизация объектов стандартизации направлена на создание типовых деталей, конструкций (технологических процессов и др.).

Оптимизация объектов стандартизации 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 функционально 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).

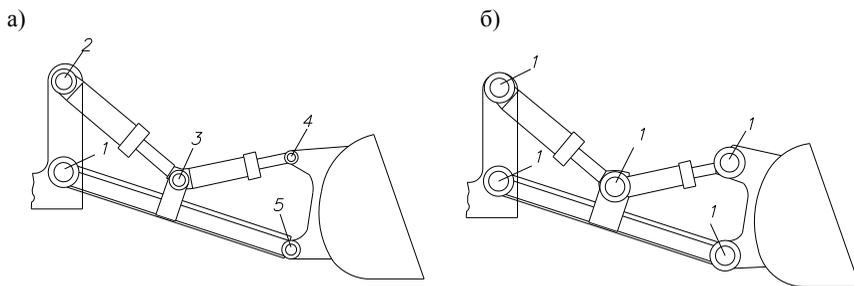


Рисунок 3.4 – Подвеска ковша фронтального погрузчика:
а – до унификации шарнирных узлов; б – после унификации

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* унифи-

кация 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 Амкордор 702А, которое унифицировано с погрузочным оборудованием бульдозера-погрузчика Амкордор 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 машины различного назначения для летнего и зимнего содержания дорог, очистки и мойки тоннелей и защитных дорожных экранов, машин с комбинированным пневмоколесно-рельсовым ходом.

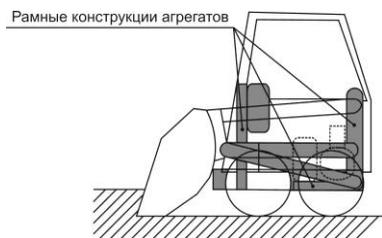


Рисунок 3.5 – Агрегатированная конструкция универсального малогабаритного погрузчика

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 митрактор 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, траншекопатель, 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.

Одним из примеров агрегатирования является *метод агрегатно-модульной компоновки* машин. Машины выполняют в виде специализированных 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 при сборке: 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 уровня 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 резьбных, 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*, который заключается в выборе и обосновании целесообразной номенклатуры и численного значения параметров. Наиболее важными параметрами продукции являются показатели, которые определяют ее назначение и условия использования:

- 1) размерные (например, 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», устанавливаю-

шего ряда чисел для выбора линейных размеров. Достоинствами применения системы предпочтительных чисел являются сокращение параметров однотипной продукции.

Разновидностью параметрического ряда является *типоразмерный ряд*, главным параметром которого является размер изделия. На основе типоразмерных рядов создают конструктивные ряды моделей машин (или узлов) одинаковой конструкции. При этом параметрический ряд должен содержать самое выгодное число типоразмеров изделий при минимальных затратах на их производство. Классическим примером типоразмерного ряда могут служить стропильные одноковшовые экскаваторы. Этот ряд был разработан на основе анализа конструкций экскаваторов ведущих производителей этой продукции. Его главным параметром является вместимость ковша, по которой определены 8 типоразмерных групп, охватывающих диапазон от 0,15 до 10,0 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 (ОС) – 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. Объектами ОС являются, как правило, наиболее важные виды продукции и процессы (нормы, правила, характеристики, требования), параметры которых могут изменяться в течение срока действия стандартов.

Обязательным признаком ОС 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 должны быть оптимальными в планируемом промежутке времени, при которых заданная цель достигается с минимальными затратами и обеспечивается наибольший технико-экономический эффект при проектировании, производстве и эксплуатации изделий.

Научно-технической базой ОС являются результаты научных исследований и новые технические решения (изобретения), которые приняты к реали-

зации, 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.

3.4 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).

Относительно новый 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 предшествующих утилизации этапах жизненного цикла машины.

В общем виде жизненный цикл машины приведен на рисунке 3.б.

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.

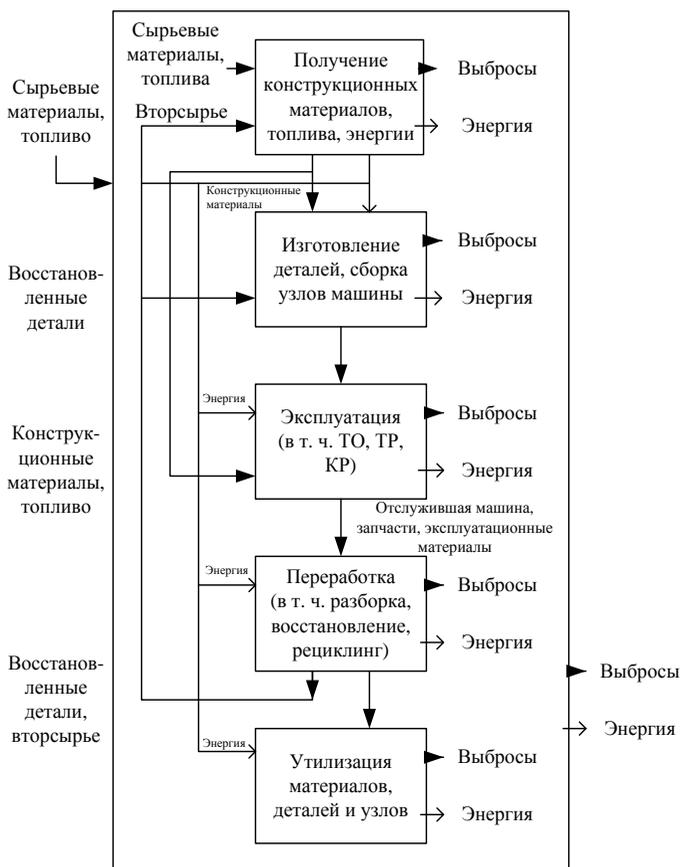


Рисунок 3.6 – Схема жизненного цикла машины с потоками материалов и энергии (выбросы – это любое загрязнение окружающей среды)

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 2005 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 ведут работы 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 повторного 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.

ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННЫХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Одним из современных направлений развития машиностроения является снижение материалоемкости машин за счет использования 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 (Be, Al, Ti) и сплавы на их основе.

Особенно важным является сочетание малой плотности (ρ) материалов и высоких показателей их прочности (σ_b) и жесткости (E), 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) предназначены в основном для несилловых, а также малонагруженных деталей и конструкций машин.

Материалы с высокой удельной прочностью (сплавы на основе Ti, Be и др.) предназначены в основном для средне- и тяжелонагруженных деталей и конструкций.

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.

Таблица 4.1 – Удельные показатели прочности и жесткости материалов

Материал*	σ_b , МПа	$\sigma_w/(\rho g)$, 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 %).			

4.1 Материалы со стабильными свойствами для основных деталей и конструкций строительных и дорожных машин

Выбор материалов для деталей и конструкций машин является весьма ответственной стадией процесса проектирования. Он определяется в основном необходимостью обеспечения требуемой надежности деталей, узлов и агрегатов в течение заданного срока службы с учетом габаритов деталей, а также технико-экономических и технологических возможностей предприятия-изготовителя. Сложные условия эксплуатации машин (воздействие переменных нагрузок и ударов, резкие колебания температуры и др.) предъявляют 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 обладать однородными химическим составом и структурой, стабильными физико-механическими свойствами, в том числе высокой прочностью и достаточной пластичностью, а также способностью воспринимать термическую и химико-термическую обработку.

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 индустриальными 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 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 введенных 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 (серы и 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 горячей деформации). Его осуществляют введением в расплав марганца, кремния и алюминия.

Углерод оказывает определяющее влияние на свойства сталей. С увеличением содержания углерода существенно возрастают прочность и твердость, но снижаются пластичность 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.

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, валы, оси изготавливают из сталей Ст4; болты, тяги, малонагруженные валы, зубчатые колеса, звездочки, оси, траверсы, крюки и т. п. – из стали Ст5; шестерни, валы, шпонки, более нагруженные оси, кованные катки, установочные винты, тормозные ленты, червяки – из стали Ст6.

Этим сталям отдают предпочтение в тех случаях, когда работоспособность деталей и конструкций определяется жесткостью. При этом их геометрические характеристики часто оказываются такими, что прочность конструкциям заведомо обеспечивается. Кроме того, при выборе материала для металлоконструкций большую роль играет свариваемость стали и ее способность к холодной обработке давлением. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают низкоуглеродистые стали, при этом основным материалом металлоконструкций кранов, других грузоподъемных и строительных машин является сталь СтЗ.

Углеродистые качественные стали имеют меньшее (по сравнению со сталями обыкновенного качества) содержание вредных примесей. Их поставляют в виде проката, поковок и других полуфабрикатов с гарантированным 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.).

Стали 15, 20 и 25 используют для изготовления деталей небольшого размера (кулачки, толкатели, малонагруженные шестерни и т. п.), которые должны иметь износостойкую поверхность и вязкую сердцевину. Их также используют для изготовления деталей относительно небольшой прочности (штулки, штуцера, крепежные детали 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 небольшого размера, работоспособность которых зависит от сопротивления усталости материала (шатунны, коленчатые валы малооборотных двигателей, зубчатые колеса, маховики, оси и т. п.).

Легируемые стали имеют гарантированный химический состав и механические свойства. Для легирования обычно используют Cr, Si, Mn, Ti, Ni, Mo, V, W. Легирующие элементы вводят с целью повышения конструкционной прочности сталей, что достигается только в термически упрочненном состоянии сталей – после закалки и отпуска. В отожженном состоянии легируемые стали по физико-механическим свойствам практически не отличаются от углеродистых. В связи с этим обеспечение необходимой прокаливаемости является наиболее важным назначением легирования. Все легирующие элементы, кроме кобальта, увеличивает прокаливаемость. Введение нескольких элементов существенно повышает прокаливаемость, например, введение хрома и молибдена, хрома и никеля, хрома, никеля и молибдена и др.

Если рассматривать их удельную прочность, то она превосходит подобную характеристику углеродистых сталей в 2–2,5 раза (см. таблицу 4.1) (при одинаковой плотности). Это дает значительные технико-экономические преимущества деталям и узлам, изготовленным из легируемых сталей.

Например, изготовление ковша одноковшового экскаватора большой мощности из низколегированной стали взамен углеродистой позволяет увеличить его вместимость (и производительность машины) на 20–25 % или уменьшить массу ковша на 15 %.

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 цементуемых и нитроцементуемых 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. Сталь 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 относятся к дешевым конструкционным материалам, обеспечивающим среднюю прочность изделиям (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 большим статическим и динамическим нагрузкам.

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

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 удельную 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 $\sigma_{\text{в}} > 1500$ МПа ($\sigma_{\text{в}}$ – 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 деформации) обработки, имеют следующие легированные стали:

1) среднеуглеродистые (после низкого отпуска или термомеханической обработки);

2) мартенситно-стареющие;

3) метастабильные аустенитные (трипстали).

Среднеуглеродистые (хромокремнемарганцевая 30ХГСА, хромоникелевая 40ХН, хромоникельмолибденовая 40ХН2МА и др.) стали, упрочненные термомеханической обработкой (пластическая деформация и закалка), обладают высокой прочностью ($\sigma_{\text{в}} = 2000 \dots 2800$ 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 объемноупрочненных высокопрочных сталей применяют более дешевые низко- и среднеуглеродистые стали, подвергнутые поверхностному упрочнению: 1) закалке с индукционным нагре-

вом; 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 относительно 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, обжиг, термообработка и др.).

Свойства спеченных материалов позволяют использовать детали из них в мало-, 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 $pv = 2 \dots 5$ 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 для 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 взаимодействия 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 съемных 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 группы:

- 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 600 К). 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.

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.

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

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 высокомарганцовистые 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 хромом, никелем, молибденом и другими элементами для придания пластичности.

Таблица 4.3 – Состав и твердость высокомарганцовистых 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.

Таблица 4.4 – Состав и твердость хромовольфрамовых и хромомолибденовых сталей

Наплавленный металл	Содержание элементов, %							HRC
	C	Si	Mn	Cr	N	Mo	V	
25Х5ФМС	0,25	1,1	0,6	5,2	–	1,2	0,4	40–46
3Х2В8	0,32	0,6	0,8	2,5	8,5	–	0,3	44–50
3Х3В3М3Ф	0,30	1,0	0,7	3,2	2,5	2,4	0,7	44–48
5Х4В3Ф	0,50	0,5	0,8	4,0	3,5	–	0,4	40–44
110Х14В13Ф2	1,20	0,5	0,7	14,5	13,0	–	1,7	40–55

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.

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 C_{23}C_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.

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	–

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.

Хромокобальтовые сплавы (стеллиты) характеризуются износостойкостью и коррозионной стойкостью при температурах до 1000 °С. Их приме-

няют 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 наплавленного 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 наплавленного 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.

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

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.

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 Многофункциональные композиционные материалы с комплексом 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 материал- и энергоемкости техники связано с разработкой и эффективным использованием композиционных материалов (композитов), а также с объемами производства и потребления изделий из них. Отметим, что это направление современного материаловедения – композиционные материалы (КМ) и изделия из них – отнесено к одному из приоритетных направлений развития науки и техники Беларуси.

Применение КМ 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 нагрузок и определяют прочность, жесткость и твердость КМ, а также влияют на их фрикционные, магнитные, теплофизические и электрические свойства.

КМ 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) волокноупрочненные;

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

На рисунке 4.1 представлены принципиальные схемы армирования КМ дисперсными и волокнистыми наполнителями.

Некоторые КМ по удельным показателям прочности и жесткости, сопротивлению усталостному разрушению в широком температурном интервале и другим свойствам значительно 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. Многообразие 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 других конструкционных и триботехнических 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 КМ обусловлены основными свойствами исходных компонентов. В настоящее время КМ 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, элементы сборных конструкций высотных сооружений и т. д.) и в других областях народного хозяйства.

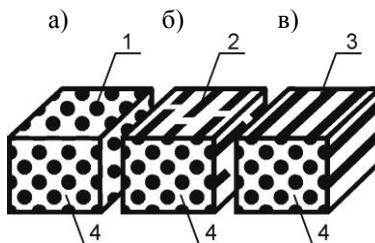


Рисунок 4.1 – Схема структуры дисперсно- (а) и волокноупрочненных (б, в) КМ:

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

КМ 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 КМ* 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.

Большой 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 *волоконупрочненных КМ* наполнителями являются волокна или нитевидные кристаллы чистых элементов и тугоплавких соединений (C , B , Al_2O_3 , SiC и др.), а также тонкая проволока из металлов и сплавов (высокопрочная сталь, Mo , W и др.). Для армирования используют дискретные ($l/d \approx 10-10^3$) 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 упорочнения.

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 трехмерные структуры.

Прочность волокнупрочненных 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 волокнупрочненных КМ.

Таблица 4.9 – Физико-механические свойства КМ 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.

КМ на полимерной матрице отличают широкие возможности 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).

Таблица 4.10 – Диапазоны изменения основных характеристик КМ 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 КМ на основе полимерных матриц эффективно используется низкая плотность полимеров – от 0,9 до 2,2 г/см³. Сочетая их с высокомодульными 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.

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 известного 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 агрегатные состояния (жидкое, твердое) и свойства материала. У твердых полимеров этот показатель составляет от $4 \cdot 10^3$ до 10^6 и более единиц.

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 4.2). Макромолекулы линейных полимеров состоят из длинных неразветвленных молекулярных цепей, в которых содержатся, как правило, одинаковые атомные группировки (см. рисунок 4.2, *a*). 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.

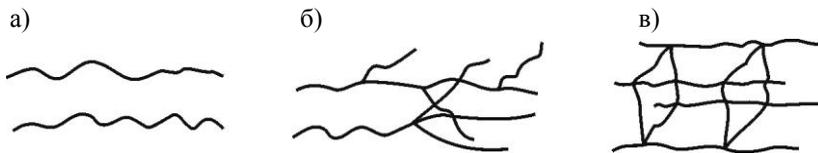


Рисунок 4.2 – Строение макромолекул полимеров:
а – линейных; *б* – разветвленных; *в* – сетчатых

В полимерах *разветвленного строения* (см. рисунок 4.2, *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 4.2, *в*) цепи макромолекул связаны между собой прочными химическими связями, образуя сетчатую (пространственную или шитую) 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 4.2, 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 *термореактивные* (термоотверждаемые) полимеры. Тер-

мопластичные полимеры (термопласты), имеющее 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 нагревании, 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.

Таблица 4.11 – Физико-механические свойства термопластов

Материал	Плотность, г/см ³	Прочность при растяжении σ_r , МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость по Бринеллю, МПа	Температура плавления, °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	–
Полиамиды	1,12–1,16	50–80	50–100	100–150	225–270
Поликарбонаты	1,2	60–80	50–100	110–160	220–270

Для сравнения в таблице 4.12 представлены свойства распространенных реактопластов в отвержденном состоянии, т. е. имеющих сетчатую (сшитую) структуру макромолекул.

Таблица 4.12 – Физико-механические свойства терморезактивных полимеров

Полимерная матрица	Плотность, г/см ³	Прочность при растяжении σ_r , МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Модуль упругости при растяжении, 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

Сравнение 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).

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.

Наибольшее распространение для деталей и конструкций мобильной техники имеют матрицы на основе термореактивных полимеров (эпоксидных, фенолоформальдегидных и полиимидных).

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 раза 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, которые 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 КМ 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 КМ, имеющие относительно низкий уровень прочностных свойств, используют в основном для изготовления мало нагруженных деталей и несилевых элементов конструкций машин.

В качестве волокнистых наполнителей используют углеродные, борные, стеклянные и органические волокна в виде нитей, жгутов, лент, тканей и нетканых материалов. 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.

Наиболее известными КМ 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 4.3 представлены наиболее распространенные схемы армирования непрерывными волокнистыми наполнителями слоистых пластиков.

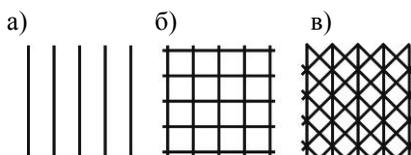


Рисунок 4.3 – Схемы армирования полимерной матрицы в слоистых КМ: а – однонаправленное (1:0; 0°); б – перекрестное (1:1; 90°); в – перекрестное (1:1; 0°, ±45°)

В таблице 4.13 представлены показатели свойств полимерных волоконно-армированных КМ на основе эпоксидных связующих, которые свидетельствуют об их высокой конкурентоспособности по сравнению с металлическими сплавами.

Таблица 4.13 – Свойства полимерных КМ

Материал	Плотность, г/см ³	Прочность при растяжении, ГПа	Модуль упругости при растяжении, 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.

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

$$\begin{aligned} \sigma_k &= \sigma_n C_n + \sigma_p C_p, \\ E_k &= E_n C_n + E_p C_p, \end{aligned}$$

где σ_n , σ_p – прочностная характеристика волокнистого наполнителя и полимерной матрицы;

C_n , C_p – содержание наполнителя и полимера в композите (отметим, что $C_n + C_p = 1$).

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 (волокон, 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 ее расплавами или растворами 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 наиболее эффективных методов получения несилковых 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 (зубчатые колеса, уплотнительные, установочные, направляющие кольца и др.) из пресс-формы после охлаждения.

На рисунке 4.4 представлена принципиальная схема изготовления деталей из термопластов литьем под давлением.

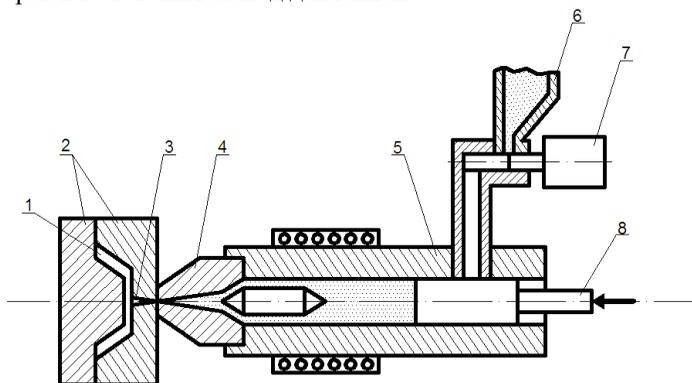


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема получения деталей из термопластичных полимеров литьем под давлением:

- 1 – формирующая полость, повторяющая конфигурацию детали; 2 – литневая 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)

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 несилевых деталей из реактопластов является *литьевое прессование*. На рисунке 4.5 представлена принципиальная схема этого метода. Он включает следующие операции:

- 1) подготовка исходных компонентов;
- 2) приготовление из них пресс-материала;
- 3) пропускание пресс-материала через литевой 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.

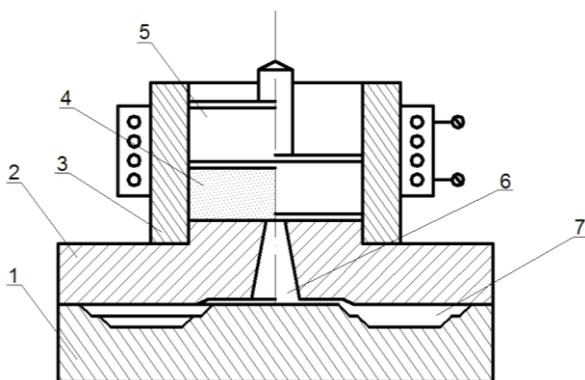


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема получения деталей из термореактивных полимеров методом литьевого прессования:

- 1, 2 – нижняя и верхняя половинки формы; 3 – отогреваемая камера; 4 – реактопласт;
5 – пуансон; 6 – литник; 7 – формирующая полость

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. Технологический процесс получения изделий в виде втулок включает следующие операции (принципиальная схема представлена на рисунке 4.6):

- 1) подготовка исходных компонентов (например, жгута из стекловолокон и раствора реактопласта (эпоксидного связующего) в органическом растворителе);

2) намотка на оправку (дорн), повторяющую форму изделия, жгута, который предварительно пропитывают раствором связующего, пропуская его через ванну с раствором;

3) размещение заготовки в автоклав и термообработка 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.

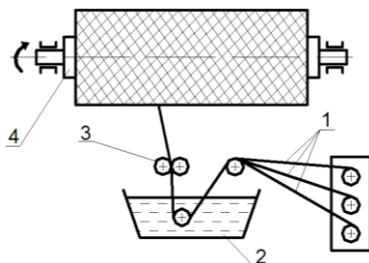


Рисунок 4.6 – Принципиальная схема изготовления трубчатых изделий намоткой стекложгута:

- 1 – стекложгут; 2 – пропиточная ванна с раствором полимера;
3 – отметочные 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 4.7 представлена принципиальная схема метода получения композитов, получившая название «порошковая технология» (полимерное связующее в исходном состоянии представляет собой порошок).

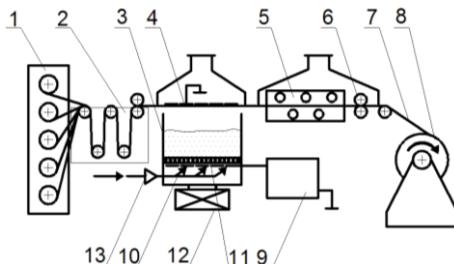


Рисунок 4.7 – Принципиальная схема получения препрегов углепластиков на основе порошкообразных полимерных связующих:

1 – стойка с рулонами жгутового наполнителя; 2 – блок роликоопор; 3 – аппарат псевдооживления; 4 – электрод осадительный; 5 – камера термообработки; 6 – валки калибрующие; 7 – препрег; 8 – рулон готового препрега; 9 – источник высокого напряжения; 10 – решетка пористая; 11 – электрод высоковольтный; 12 – вибратор; 13 – система подачи псевдооживляющего агента

Этот метод включает следующие операции:

- 1) подготовка 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) термообработка препрега и его смотка в рулон;
- 5) выкладка необходимого количества слоев препрегов по форме детали;
- 6) прессование и термообработка системы для получения детали;
- 7) механическая обработка детали;
- 8) 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, в ряде самолетов объем композиционных материалов доходил до 60–70 %.

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. В частности, в транспортном машиностроении применение композитов в грузовых автотранспортных средствах достигает тонны 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, вклю-

чая 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 уникальных свойств КМ 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 м^3) 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 $-200\text{ }^\circ\text{C}$ до $+300\text{ }^\circ\text{C}$) в воздушной и вакуумной средах, в жидких средах, не обладающих смазоч-

ным 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 углеродистые 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 (фторопласт-4, тефлон), который является термопластичным полимером. Симметричное расположение атомов фтора $[-CF_2-CF_2-]$ – обеспечивает ему исключительно низкий 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 4.8 приведена принципиальная схема металлофторопластового ленточного материала.

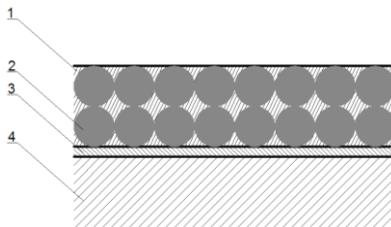


Рисунок 4.8 – Схема металлофторопластового ленточного материала:

- 1 – слой фторопласта-4 с наполнителями;
- 2 – частица бронзы; 3 – слой меди;
- 4 – стальная лента

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 фторопластом-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.

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 сфер 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 °С 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 перечне приоритетных направлений развития науки и техники Беларуси особое место занимают такие перспективные материалы, как наноструктурные системы для силовых элементов конструкций и узлов машин.

К наноструктурным материалам (наноматериалам) относят структурные элементы, размеры которых составляют 1–100 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$, «нано» от греческого *nanos* – карлик). Это могут быть кристаллы, частицы, волокна, слои, покрытия, а также отдельные элементы структуры или компоненты сплавов и композитов.

Большой интерес к этим материалам связан с возможностями нанотехнологий получать материалы, которые по свойствам многократно превосходят известные материалы, изготовленные по традиционной технологии.

Аномально высокий уровень свойств наноматериалов обусловлен двумя основными причинами: во-первых, *размерным эффектом*, поскольку в нанозементах с уменьшением размеров увеличивается доля активных атомов, которые располагаются на поверхности, во-вторых, *соизмеримостью* наночастиц с характерными параметрами, определяющими многие физические свойства твердых тел: длиной свободного пробега электронов, длиной волны упругих колебаний, размером магнитных доменов в ферромагнетиках и др.

Современные наноматериалы для мобильной техники можно разделить на следующие группы:

1) *дисперсные системы*, в том числе нанопорошки материалов, сплавов, интерметаллов, оксидов, карбидов, нитридов, боридов и др.;

2) *компактные* (так называемые *консолидированные или массивные*) *материалы*, состоящие из зерен нанометрового размера и получаемые из дисперсных систем методами порошковой металлургии (т. е. припеканием при высоких температурах);

3) *тонкослойные наносистемы* в виде покрытий или пленок, сформированных путем конденсации металлов из газовой фазы, и фольги, полученной путем пластического деформирования тонкого слоя наночастиц;

4) *сплавы и композиты*, содержащие наноструктурные модификаторы (легирующие добавки, армирующие наполнители, пластификаторы и др.).

В настоящее время наносистемы перечисленных групп используют в технике в различных масштабах.

Наносистемы первой группы применяют довольно давно: суспензии наночастиц некоторых металлов (как правило, железа или его сплавов) размером от 30 нм до 1 мкм вводят в качестве присадок в моторные масла для восстановления изношенных элементов двигателей внутреннего сгорания.

Наносистемы второй и третьей групп в мобильной технике еще не нашли широкого применения. В основном их использование ограничивается исследовательскими работами или малыми сериями изделий (для испытаний или опытной эксплуатации). Это связано с высокой стоимостью наносистем этих групп, а также с повышенной трудоемкостью технологического процесса с учетом довольно крупных габаритов деталей силовых трансмиссий машин. Поэтому в настоящее время изделия из этих наносистем используют преимущественно в микроэлектронной технике, а также в отраслях, где экономический фактор не является препятствием для их использования. Например, в авиакосмической технике наносистемы активно применяют в качестве радиопоглощающих материалов. Для этого на внешние поверхности фюзеляжа и крыльев летательных аппаратов наносят керамические покрытия, в матрице которых хаотично распределены тонкодисперсные металлические частицы, что делает их практически неуловимыми для радаров.

Четвертая группа наносистем является наиболее привлекательной с экономической и технологической точек зрения для конструкционных и триботехнических материалов, а также изделий из них. Существенное повышение свойств основы (металла или полимера) достигается за счет введения малых количеств нанодисперсных модификаторов. В этой группе интенсивно развиваются исследования эксплуатационных свойств нанокompозитов на основе полимеров, трудоемкость изготовления изделий из которых на порядок ниже, чем наноматериалов на основе металлов.

Эти исследования имеют целью расширить области применения полимерных нанокompозитов в технике за счет реализации их основных достоинств. Как отмечалось, 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 нанокompозитов на 20 % легче, чем детали из высоконаполненных композитов, и на 80 % превосходят детали из стали.

Наибольший интерес представляют *полимер-силикатные, полимер-углеродные и металлосодержащие нанокompозиты*.

Полимер-силикатные нанокompозиты представляют собой полимерную матрицу, в которую 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 нанокompозиты используют в несилевых конструкциях машин (панели, вентиляционные решетки, детали систем кондиционирования), а также в приводах систем обеспечения (зубчатые ремни).

Полимер-углеродные нанокompозиты состоят из полимерной матрицы и углеродных наносистем. В качестве углеродного наполнителя применяют в основном два вида модификаторов: фуллерены и тубулены. 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. Нанотрубки отличает высокая механическая прочность: при плотности в 6–7 раз меньше плотности стальных волокон по удельной прочности они превосходят сталь на два порядка. Их введение в полимеры существенно улучшает эксплуатационные свойства полимерной матрицы, например, интенсивность изнашивания такого антифрикционного материала, как политетрафторэтилен снижается в 300 раз.

Металлосодержащие нанокompозиты активно исследуют, анализируя возможности их использования в узлах трения машин и механизмов. В качестве модификаторов проверяют различные металлы (Fe, Pd, Pt, Ni, Co, Au, Ag и др.), соли и оксиды металлов.

Способность нанонаполнителей существенно улучшать эксплуатационные свойства полимеров связана с очень большой удельной площадью поверхности наночастиц. Поэтому даже при небольшой концентрации влияние наночастиц выражается в том, что практически вся полимерная матрица приобретает структуру граничных с частицами слоев, которая отличается более совершенным расположением макромолекул полимера.

Анализируя современное состояние наносистем применительно к машиностроению, можно отметить, что наука пока еще не вышла за рамки исследований и опытных испытаний. При этом следует обратить внимание на весьма многообещающие перспективы. По-видимому, в ближайшие 10–20 лет будут производиться наноматериалы для массового производства, в том числе конструкционные материалы с повышенной удельной прочностью, а также триботехнические материалы, обладающие высокой износостойкостью и существенно превосходящие современные материалы. При этом технология станет более совершенной, поскольку для композитов в данный момент серьезной проблемой является обеспечение равномерного распределения добавок в объеме матрицы.

В далекой перспективе можно предположить возможность моделирования и конструирования структуры материала на атомно-молекулярном уровне для получения необходимого набора технологических характеристик и эксплуатационных свойств с учетом формы и конфигурации детали, нагрузок и условий эксплуатации машины.

4.6 Адаптивные материалы и конструкции

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 можно использовать 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 отслежи-

вать 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 демпферам (механическим или гидравлическим), обеспечивая оптимальную энергоемкость 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 герметизации 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», которые используют 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, которые могут многократно изменять свою форму при нагреве и охлаждении (различные клапаны, рычаги и др.)

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.

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.

В не слишком далекой перспективе материалы этой группы должны отслуживать в процессе эксплуатации деформации, вибрации, износ и другие негативные явления. И не доводя конструкцию до разрушения (т. е. до образования трещин и других дефектов), компенсировать влияние окружающей среды заданным изменением соответствующих характеристик (строения, структуры, свойств) интеллектуального материала.

В будущем адаптивные материалы могут стать основными функциональными материалами для наиболее 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.

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ

5.1 Основные направления повышения надежности на этапе изготовления

На втором этапе – этапе изготовления – обеспечение надежности, заложенной при проектировании и конструировании машин, можно реализовать с помощью организационных мероприятий и технологических методов. Отметим, что на этом этапе также работает принцип минимизации себестоимости выполнения работ. Поэтому необходим технико-экономический анализ различных вариантов при выборе технологического процесса.

К организационным мероприятиям относятся:

- 1) выбор необходимого станочного оборудования и приспособлений, режущего и измерительного инструмента (с учетом возможностей производства);
- 2) применение типовых производственных процессов (в том числе групповой обработки деталей);
- 3) выбор рациональной технологии изготовления типовых деталей;
- 4) дальнейшая специализация 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) создание напряженного состояния в металлоконструкциях для компенсации внешних нагрузок.

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.

Технологичность конструкции машины – это совокупность свойств конструкции, обеспечивающая удовлетворение эксплуатационных требований при минимальных затратах на ее изготовление. При этом следует учитывать конкретные условия производства и объем выпуска.

В процессе технологической подготовки производства конструкцию машины отрабатывают на технологичность деталей, сборочных единиц и машины в целом. Технологический процесс должен быть выбран в соответствии с конструктивным решением. При этом само решение можно совершенствовать с учетом возможностей процесса, но без ущерба для функциональных качеств детали.

Различают производственную, эксплуатационную и ремонтную технологичность конструкции.

Производственной технологичностью конструкции машины называют свойство конструкции, позволяющее изготовить и собрать машину в условиях данного производства с наименьшими затратами труда и материалов при обеспечении заданного качества. Ее связывают с сокращением времени и средств на технологическую (проектирование всех видов технологических процессов, разработку и изготовление необходимого оборудования и технологической оснастки) подготовку производства, а также на изготовление, контроль и испытания изделий.

Отработка 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, преемственности конструктивных решений; снижения материалоемкости и применения высокопроизводительных типовых технологических процессов.

Важную роль в обеспечении технологичности играет *единая система технологической подготовки производства* (ЕСТПП), которая предусматривает широкое применение прогрессивных технологических процессов, техоснастки и оборудования, эффективных инженерно-технических и управленческих методов, средств механизации и автоматизации производственных процессов. ЕСТПП обязывает отрабатывать новые конструкции машин на технологичность на всех этапах их 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 осуществляют выбор оптимального варианта принципиальной схемы и базовой конструкции, которая должна лежать в основе проектируемой машины; унифицируют сборочные единицы и основные детали; 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; отрабатывают 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 (толщины 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 максимальную унификацию элементов конструкции (модулей, диаметров, резьб, шлицевых соединений и др.).

При отработке конструкции машины на технологичность необходимо заложить свойства, обеспечивающие ее качественное изготовление и рациональное использование ресурсов. Это требует установления соответствия между конструкцией машины и производственными условиями ее изготовления, обоснованного применения материалов и рациональной преемственности конструктивно-технологических решений. Технологичность конструкции, являясь одним из показателей качества машины, в значительной мере определяет уровень технико-экономических показателей производства: тип и форму организации, наличие соответствующих условий и оборудования, продолжительность и серийность выпуска.

Для обеспечения необходимого уровня технологичности конструкции машины, а также ее сборочных единиц и деталей необходимо выполнить ряд требований, в числе которых следующие:

- 1) оптимальное расчленение машин и их составных частей на независимые сборочные единицы;
- 2) широкое использование принципов конструктивной и технологической преемственности, а также унификации и симплификации;
- 3) рациональное ограничение марок и сортментов 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 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.).

При обработке конструкции деталей на технологичность, прежде всего, следует учитывать организационно-технические условия их производства, а также возможность реализации эффективных технологических процессов. При этом следует иметь в виду объемы производства и серийность выпуска деталей, поскольку эффективные технические решения в условиях массового производства могут оказаться неэффективными в мелкосерийном производстве (и наоборот).

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 себестоимость 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 их 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.

Примером обеспечения технологичности может служить обработка посадочных, центрирующих и других рабочих поверхностей резанием. При обработке напроход не следует использовать для опорных поверхностей углубления (получаемые, например, зенкерованием) или выступы на разных уровнях, что затрудняет их обработку и расположение инструмента. Целесообразно предусмотреть поверхности на одном уровне, которые легко обрабатываются фрезой или шлифовальным кругом напроход.

Из соображений технологичности сборки довольно часто используют корпуса, в которых разъем проходит через отверстия под подшипники, уплотнения и маслопроводные каналы. В этих случаях целесообразно осуществлять обработку в сборе. Для обеспечения точности относительного

положения деталей при сборке, обработке и последующих разборках и сборках предусматривают штифтовое соединение или центрирующие сопрягаемые поверхности.

Высокой точности достигают при обработке целой детали, которую только перед сборкой разламывают по специально ослабленному сечению. При сборке части детали благодаря неровностям поверхностей разлома занимают точно такое относительное положение, что и в процессе обработки.

Существенного увеличения производительности достигают, используя обработку в пакете, – обработку напроход нескольких одинаковых деталей, установленных на одном станке или на одной оправке. Однако качественная обработка невозможна при их неточной установке или при недостаточной жесткости деталей в направлении силового воздействия инструмента. Поэтому зубчатые колеса должны иметь торцовые поверхности, строго перпендикулярные осям отверстий. Следует отметить, что не только консольное расположение детали и инструмента влияет на точность изготовления. Если сама деталь будет иметь переменное (по длине) сечение, то и воздействие со стороны режущего инструмента также будет переменным.

При конструировании литых деталей (металлических отливок) следует придерживаться приемов конструирования, обеспечивающих технологичность отливок – деталей или заготовок, получаемых литьем. Отливка должна иметь простую форму с минимальным числом плоскостей разъема формы и возможностью извлечения модели или стержней без разрушения. Следует избегать замкнутых внутренних полостей и ступенчатых разъемов. Крупные и сложные изделия целесообразно разделить на простые детали, соединяемые в последующем болтами или сваркой. Конструкции должны иметь минимальное количество сопряжений, без разветвлений контуров стенок. Для извлечения моделей из формы предусматривают на отливках формовочный (литейный) уклон, величина которого зависит от способа литья. Для обеспечения равномерного остывания и уменьшения внутренних напряжений в результате неравномерной усадки (с целью исключения раковин, трещин и коробления отливки) стенки отливки должны иметь равномерную толщину, а переходы и сопряжения между стенками, соединяемыми под углом, должны быть плавными. Для обеспечения точности механической обработки отливок следует предусмотреть *черновую* базу достаточной протяженности, параллельную поверхности, обрабатываемой при первой механической операции, или перпендикулярную к ней. В общем случае необходимо иметь три черновых базы для ориентации детали в пространстве.

Для литых заготовок действуют следующие ограничения:

- наружные поверхности должны состоять из прямолинейных контуров, соединенных плавными переходами;
- толщина стенок должна назначаться такой, чтобы исключить резкие отклонения в их размерах;

– необходимо избегать выступающих частей, больших тонких ребер и таких сочетаний поверхностей, которые затрудняли бы изготовление литейной формы;

– форма заготовки должна исключать затруднения при разьеме модели.

В зависимости от применяемого вида литья (литье в кокиль, в оболочковые формы, по выплавляемым моделями, 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 штамповсварными. Конструкции литых заготовок корпусных деталей должны отвечать указанным ранее требованиям машинной формовки: 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 (для этого плоскости и торцы не должны иметь выступов, мешающих обработке), размеры обрабатываемых отверстий внутри детали не должны превышать 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 др.

Детали указанной формы со сквозными отверстиями должны иметь конструкцию, предусматривающую обработку только сопрягаемых поверхностей; их форма должна обеспечивать возможность получения заготовок с минимальными допусками. Следует исключать возможность их деформирования при термической обработке.

Технологичность конструкций мелких деталей (из отливок, штамповок и прутков) обеспечивается небольшим количеством обрабатываемых поверхностей с минимальными допусками 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, а также 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. Поэтому использование этого вида формообразования деталей должно быть экономически обоснованным.

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 геометрическую форму с наличием штамповочных уклонов на вертикальных стенках, а также плавные скругленные контуры. Пространственные детали сложной формы технологично изготавливать с применением холодной штамповки. Вид холодной штамповки (гибка, вытяжка, холодное выдавливание, холодная объемная штамповка и др.) во многом определяет совокупность требований, характеризующих технологичность детали.

Основные требования, характерные для конструирования отливок, используются и для конструирования деталей, получаемых другими способами. Например, в штампованных деталях также следует 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 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 однослойным, желателен прямолинейным движением при сборке без поворота детали. При конструировании сборочных единиц не рекомендуется применять гибкие детали и соединения (провода, кабели, ремни), а использовать армированные детали и жесткие разъемные соединения. При автоматизированной сборке используют различные приемы повышения технологичности сборочного процесса, в частности, осуществляют совмещение процессов изготовления отдельных простых деталей и их сборки, а также предсборочное группирование деталей. Кроме того, используют центрирующие элементы, обеспечивающие точность ориентации деталей в начальный момент соединения и последовательное сопряжение поверхностей, а также направляющие элементы, фаски, скругления, конусы и канавки, облегчающие начальную ориентацию деталей соединения. Конструкция деталей должна исключать их заклинивание.

Следует в максимальной степени использовать унифицированные элементы соединений. При выборе вида соединений следует иметь в виду, что винтовое соединение с резьбовым отверстием в теле детали проще для автоматизированной сборки, чем болтовое соединение, в котором больше деталей (гайки, шайбы). Шпоночные соединения при сборке валов целесообразно заменять шлицевыми или неподвижными фрикционными соединениями; следует также заменять резьбовые соединения клепаными или сварными (например, контактной сваркой).

Сборка упрощается при использовании 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.

Следует избегать сборки соединений склеиванием, поскольку продолжительные процессы затрудняют синхронизацию переходов сборочных работ.

Автоматизированное сборочное оборудование по сравнению с ручной сборкой требует более жестких допусков на детали. При автоматизированной сборке методы полной, неполной или групповой взаимозаменяемости, пригонки и регулирования используют в различной степени. Наиболее просто осуществляется сборка при полной взаимозаменяемости. Неполная и групповая взаимозаменяемость требует дополнительных устройств контроля и усложняют систему управления. Еще сложнее осуществить автоматизированную сборку, используя пригонку или регулирование.

Значительную роль в обеспечении технологичности при сборке играют приспособления. При конструировании следует учитывать их функциональное назначение и необходимость выдерживать собственную многократную сборку и разборку. При этом приспособление не должно повреждать отдельные элементы собираемого устройства, а также предотвращать такие повреждения собственными деталями устройств. Например, в качестве приспособлений используют защитные кожухи (на время транспортировки и сборки), жесткие контейнеры (для транспортировки и сборки гибких деталей и сборочных единиц). 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.

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 захватить деталь (или сборочную единицу), не боясь ее разрушения. Их также используют для облегчения направления, ориентации и центрирования соединений. В ряде случаев для размещения элементов съёмника предусматривают специальные реборды или гнезда.

Технологичность в значительной степени зависит от конструкции отдельных *неразборных* узлов и агрегатов. В современных машинах пока предусматривают только 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.

5.3 Специализация производства и типизация производственных процессов при изготовлении деталей

Внедрение в производство высокопроизводительного оборудования и энергосберегающих технологий требует расширения и углубления специализации на предприятиях, комплексной отработки конструкции изделия на технологичность, расширенного применения методов стандартизации и унификации при технологической подготовке производства.

При выборе конструктивных решений конструктор должен от начала до конца представлять процесс изготовления детали и предусматривать по возможности минимальный объем механической обработки резанием. В частности, целесообразно детали изготавливать точным литьем, а еще лучше – штамповкой. Зубья, резьбу и другие подобные элементы лучше получать накатыванием, а не резанием. Вместе с тем механическая обработка резанием остается преобладающей для металлических деталей, особенно в случаях, когда требуется получить высокую точность в сочетании с малой шероховатостью поверхности.

Соответствие технологического процесса принятому материалу обеспечивает возможность получения заданных физико-механических свойств материала на этапах термической и химико-термической обработки и технических характеристик детали (точности размеров, шероховатости поверхности) на этапе механической обработки.

Рациональная последовательность технологических процессов и операций обусловлена как конструкцией и материалом детали, так и выбранными способами изготовления. Целесообразно предусмотреть геометрическую форму детали, для воспроизведения которой необходимо минимальное количество и разнообразие способов и операций.

Как отмечалось, совмещение технологической и измерительной баз позволяет упростить технологический процесс, избежать погрешностей базирования и сравнительно легко обеспечить заданную точность. 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 базы (ограничивающей три из шести возможных перемещений – два угловых и одно линейное), направляющей базы (ограничивающей угловое и линейное перемещения) и опорной базы (ограничива-

ющей одно линейное перемещение). Могут быть использованы и другие сочетания, в которые входят двойная опорная или двойная направляющая база. При этом должно быть принято во внимание направление силы резания, силы тяжести и силы 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.

Выбор измерительной базы не должен приводить к дополнительным погрешностям измерения, вызванным формой и расположением базы. В качестве измерительной базы используют функциональные элементы или вводят дополнительные элементы для контроля размеров.

Для того чтобы грамотно использовать современные технологические методы повышения работоспособности машин, следует иметь представления об основах технологии их производства.

Производственный и технологический процессы в машиностроении. При строительстве, содержании и ремонте объектов дорожно-строительного комплекса и железнодорожного транспорта используют машины, которые выпускаются различными отраслями машиностроения.

Процесс производства (в комплексе) 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.

Технологический 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. Именно по содержанию производственного процесса предприятия машиностроительного комплекса разделяют на следующие группы:

1) предприятия, работающие по полному технологическому циклу, на которых готовые изделия в виде машин или отдельных агрегатов изготавливаются из поставляемых им материалов. На таких предприятиях проводится заготовка и обработка деталей, а также сборка узлов и машин;

2) предприятия механосборочного типа, производящие обработку деталей из поставляемых заготовок и сборку изделий в виде узлов и машин;

3) предприятия сборочного типа, производящие сборку узлов и машин из поставляемых готовых изделий;

4) предприятия, выпускающие в качестве изделий детали определенного вида (валы, зубчатые колеса, крепежные детали и др.);

5) предприятия, выпускающие изделия в виде заготовок (например,ковки, отливки).

Кроме того, возможно изготовление различных видов продукции на одном и том же предприятии. Например, машиностроительное предприятие производит также и детали в качестве запасных частей. Другой пример: предприятие не только выпускает новую продукцию, но и производит ремонт. Различные типы машиностроительных предприятий отражают принципы специализации, без которых невозможно совершенствование продукции. Как правило, в основе специализации лежит подбор изделий по принципу конструктивно-технологического сходства (с сокращением номенклатуры выпускаемых изделий).

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.

Предметная специализация является более прогрессивной, так как обеспечивает возможность широкой механизации и автоматизации производства, упрощает его организацию и сокращает длительность изготовления изделия.

Основу производственного процесса составляет технологический процесс изготовления изделий.

Типы машиностроительного производства. Технологический процесс изготовления изделий, применяемые при этом оборудование, приспособления и инструмент определяются, как правило, числом изготавливаемых однотипных деталей.

По этому признаку производство подразделяют на три типа:

- 1) единичное;
- 2) серийное;
- 3) массовое.

Единичное производство – детали каждого типа изготавливают 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 сторона не является определяющей.

Серийное производство – детали изготавливают партиями (сериями), повторяющимися через некоторые промежутки времени. 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 – детали изготавливают непрерывно в течение продолжительного времени и в больших количествах, что позволяет закрепить за каждым 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.

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 достаточно точно можно установить, используя таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Выбор типа производства

Тип производства	Число обрабатываемых деталей в год		
	мелких ($M \leq 1$ кг)	средних ($1 \text{ кг} < M \leq 50$ кг)	крупных ($M > 50$ кг)
Единичное	< 100	< 10	< 5
Серийное	100–50 000	10–5 000	5–1 000
Массовое	> 50 000	> 5 000	> 1 000

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 промежуток времени (длительность) выпуска единицы продукции.

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 изделия 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 в эксплуатации машины, но с минимальными затратами ресурсов предприятия.

Виды заготовок и способы их получения. В машиностроении применяют следующие виды заготовок:

- отливки (из чугуна, стали, цветных металлов и пластмасс);
- поковки и штамповки (из стали и цветных металлов);
- заготовки из стали и цветных металлов (в виде проката);
- сварные заготовки;
- заготовки из металлокерамики;
- заготовки из пластмасс и композиционных материалов на основе полимеров.

Вид заготовки определяет конструктор при проектировании детали. Поэтому при разработке технологического процесса выбирают только способы получения заготовок.

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 поволоков 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 (высадку) на горизонтально-ковочных машинах;
- холодную штамповку (высадку).

Для получения заготовок из проката применяют:

- нарезание на гильотинных и прессовых ножницах;
- нарезание на приводных ножовках и дисковыми пилами;
- резку 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 используют специальные методы: накатывание, дорнование, электроискровая и анодно-механическая обработка.

Для их осуществления используют следующие инструменты: *лезвийные* (резцы, фрезы, сверла, протяжки, развертки и др.), *абразивные* (шлифовальные круги, бруски) и специальные.

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 следующих обстоятельствах:

- а) подготовка к выпуску новых машин;
- б) модернизация конструкций освоенных машин;
- в) изменение объема производства;
- г) внедрение нового технологического оборудования.

Исходные данные для разработки технологических процессов:

- а) рабочие чертежи деталей;
- б) годовая программа выпуска деталей;

- в) сведения об оборудовании;
- г) принятые типовые или групповые технологические процессы;
- д) справочные материалы (каталоги, альбомы, стандарты и др.).

Разработку предваряет технологический контроль чертежей для проверки спроектированных деталей на технологичность их конструкции.

Разработка техпроцесса должна производиться на основе использования ресурсосберегающих технологий. В общем случае она включает следующие этапы:

- 1) выбор типового (группового) технологического процесса;
- 2) анализ технологичности конструкции и разработка методов ее повышения;
- 3) выбор рационального способа получения заготовок;
- 4) выбор методов и оптимальной последовательности обработки поверхностей детали, а также ее базирования;
- 5) составление технологического маршрута обработки деталей;
- 6) разработка технологических операций;
- 7) нормирование технологических процессов (установление норм расхода материала, норм времени на обработку, квалификации исполнителей);
- 8) расчет экономической эффективности технологического процесса;
- 9) оформление технологической документации и разработка заданий на проектирование оснастки, нормоконтроль и т. д.

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 (в сокращенном описании всех технологических операций в последовательности их выполнения без указания переходов и технологических режимов) или маршрутно-операционном описании (с указанием переходов и режимов).

На стадии подготовки серийного или массового производства технологическая документация оформляется 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 способы окончательной обработки поверхности и выбирают оборудование, которое может обеспечить необходимое качество. Затем планируют всю последовательность обработки поверхности детали. При этом учитывают, что каждый последующий этап должен быть точнее предыдущего (с учетом необходимости выбора технологического припуска на каждом этапе обработки).

Итак, 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 уточняется 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. Припуском на обработку называют 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 быть оптимальным. С одной стороны его увеличение дает повышенные отходы, энергоемкость и материалоемкость. С другой стороны *пониженный припуск* – это увеличение вероятности брака (поскольку получить необходимую точность и шероховатость без удаления дефектного поверхностного слоя невозможно).

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 вычерчивания) размеров готовой детали. Затем на все обрабатываемые поверхности наслаивают (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, приспособлений и инструмента. Станочное оборудование и необходимые приспособления выбирают с учетом:

- конструкции и размеров детали;
- необходимой точности и чистоты обработки;
- требуемой производительности;
- минимальной себестоимости работ (т. е. на основе технико-экономического анализа).

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 с учетом свойств материала детали.

Измерительный инструмент выбирают с учетом требований точности, удобства и быстроты измерений.

Определение режимных параметров и времени выполнения операций.

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, наконец, 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 назначается максимально возможная величина 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 определяют расчетом или выбирают (по нормативной таблице) в зависимости от вида материала, глубины и подачи, материала 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. Важный элемент нормирования – отнесение работ к тем или иным разрядам (т. е. установление квалификации работ и соответственно рабочих).

Типизация технологических процессов. Сущность типизации состоит в том, что функционально различные, но сходные по конструктивным признакам детали объединяют в группы и изготавливают по единой техноло-

гии. Это резко увеличивает серийность и позволяет создавать поточные линии даже тогда, когда количество деталей каждого вида, входящих в данную группу, невелико.

Таким образом, при групповой обработке объектом разработки технологического процесса является не отдельная деталь, а их группа.

Объединяют детали по возможности их полного изготовления или выполнения отдельных операций по общей единой технологии на одном оборудовании с использованием единой оснастки (и с минимальной переналадкой).

В этом случае разработка технологического процесса, а также выбор оборудования и оснастки производят применительно к детали-представителю, в качестве которой принимается комплексная деталь, содержащая все обрабатываемые элементы данной группы. Отметим, что комплексная деталь может быть условной (фиктивной). При этом все детали, входящие в эту группу, будут проще комплексной детали. На рисунке 5.1 представлена комплексная деталь и детали, элементы которых включены в комплексную деталь.

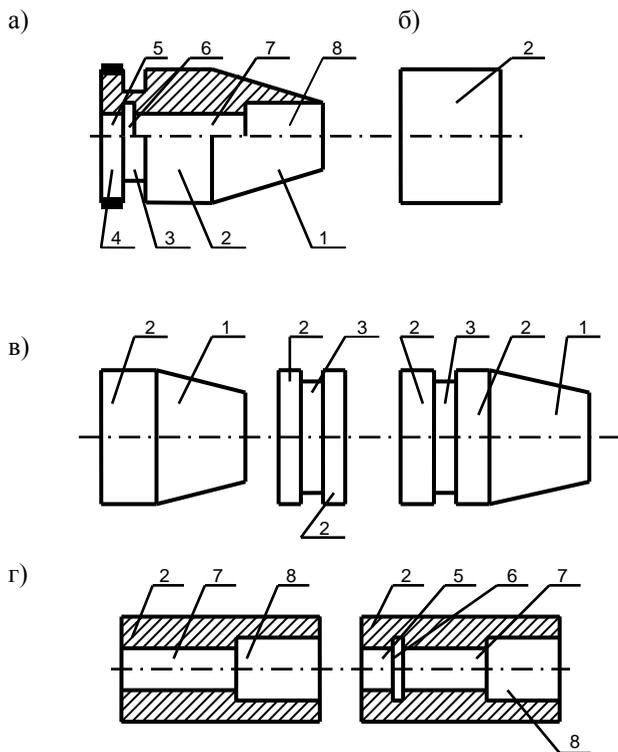


Рисунок 5.1 – Комплексная деталь (а) и детали для групповой обработки (б–г)

Технология изготовления типовых деталей машин. С учетом типизации технологического процесса все детали объединяют в группы по типовым признакам.

Технология изготовления валов. В машинах применяются гладкие, ступенчатые, полые, кулачковые и коленчатые валы. Детали класса валов имеют соотношение между длиной l и диаметром d :

$$\frac{l}{d} < 15$$

($l \leq 1000$ мм; $d \leq 120$ мм).

Как отмечалось ранее, валы изготавливают из конструкционных углеродистых сталей 40 и 45, а также из легированных сталей 40Х, 45Г2, 18ГТ и др. В качестве заготовок используют прокат сплошного сечения, трубы, поковки, штамповки (иногда отливки).

В большинстве случаев маршрут обработки валов включает:

- 1) обработку торцов заготовки;
- 2) зацентровку заготовки;
- 3) черновое обтачивание;
- 4) предварительное шлифование шеек;
- 5) фрезерование шлицев и шпоночных пазов;
- 6) сверление отверстий;
- 7) нарезание резьб;
- 8) термическую обработку;
- 9) окончательное шлифование шеек;
- 10) обработку внутренних поверхностей (у полых валов).

В условиях серийного (в том числе мелкосерийного) производства применяют станки с ЧПУ, позволяющие быстро производить переналадку станков. Конструкции современных машин предъявляют высокие требования к качеству обработки валов.

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 (ЗК). В машинах широко используют цилиндрические, конические и червячные передачи. Точность ЗК установлена стандартами от 7-й до 10-й степени. ЗК изготавливают из углеродистых и легированных сталей, реже – из чугуна и бронзы.

Стальные ЗК больших диаметров, а также чугунные и бронзовые колеса делают из литых заготовок. Стальные ЗК меньших размеров делают из поковок и штамповок, которые подвергают нормализации или улучшению.

Изготовление ЗК включает:

- 1) обработку заготовки под нарезание зубьев;
- 2) нарезание, закругление и шевингование зубьев;
- 3) термическую и отделочную обработку.

Обработку ЗК 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.

Технология изготовления корпусных деталей. К корпусным деталям относятся базовые детали, внутри которых размещают механизмы машины (например, картеры редукторов, раздаточных коробок, коробок передач и др.). Для них 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 осям; осности отверстий для подшипников каждого вала.

Корпусные детали изготавливают из чугунных или стальных отливок, иногда из алюминиевых отливок и сварных конструкций. Их обработка начинается с основных базовых поверхностей, затем поверхностей, параллельных и перпендикулярных базовым поверхностям, включая сначала основные, а затем крепежные отверстия.

При выполнении первой операции установка детали производится на черновые базы. Их выбор должен обеспечить необходимое взаимное положение обрабатываемых поверхностей и необработанных поверхностей, а также равномерное распределение припусков.

5.4 Обеспечение точности размеров и качества поверхности деталей при механической обработке

Точность изготовления детали должна соответствовать требованиям рабочих чертежей. Она зависит:

- 1) от точности станка и приспособлений, на которых производится обработка;
- 2) точности изготовления и установки режущего инструмента, степени его износа и нагрева;
- 3) точности измерительного инструмента и промеров.

Станки не могут быть абсолютно точными и одинаковыми. В зависимости от класса точности станка (и соответствующих допусков) наблюдается биение шпинделей, непрямолинейность направляющих, неперпендикулярность осей шпинделей рабочим поверхностям столов, зазоры в сочленениях. Отсюда 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 определенной степенью точности, к этому можно добавить точность его установки, нагрев и износ, что в совокупности может быть источником погрешностей.

Поэтому важное значение для обеспечения точности размеров при механической обработке имеет правильная установка заготовки на станке и связанный с этим выбор баз.

Базы используют как при изготовлении деталей, так и в ремонтном производстве.

По назначению различают конструкторские (основные и вспомогательные), технологические и измерительные базы.

Конструкторской базой называют поверхность, линию или точку детали, по отношению к которым определяют на чертеже расчетные положения других деталей или сборочных единиц изделия, а также других поверхностей и геометрических элементов данной детали. Конструкторские базы служат для определения положения детали или сборочной единицы в изделии.

Основной называют конструкторскую базу, которую используют для определения положения детали (сборочной единицы) в изделии. *Вспомогательную* конструкторскую базу применяют для определения положения присоединяемой детали относительно данной детали.

Технологической называют базу, используемую для определения положения заготовки или детали в процессе изготовления или ремонта. *Технологической базой* может быть поверхность или сочетание поверхностей, осей или точек заготовки, которые используют для ее установки и закрепления в

необходимом положении при механической обработке. Как правило, заготовку лишают всех шести степеней свободы. Для этого используют установочную, направляющую и опорную базы.

Установочной называют базу, которая лишает заготовку трех степеней свободы (перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг двух других).

Направляющей называют базу, которая лишает заготовку двух степеней свободы (перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг другой оси).

Опорной называют базу, которая лишает заготовку одной степени свободы (перемещения вдоль одной координатной оси).

Технологическими базами могут быть плоские, внутренние и наружные цилиндрические поверхности, торцовые 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* (необработанные поверхности).

Измерительной называют базу, которую используют для определения относительного положения заготовки (или изделия), а также средств измерения и отсчета размеров при обработке заготовки или при сборке изделия.

Для достижения высокой точности обработки заготовки следует совмещать технологические и измерительные базы, т. е. принимать для установки заготовки и ее измерения одни и те же поверхности, линии и точки. В противном случае, т. е. при несовпадении возникают погрешности базирования.

Погрешность базирования – это отклонение размера детали из-за несовпадения технологической и измерительной баз, получаемое при обработке заготовки, от заданного на предварительно настроенном станке. Это происходит из-за того, что расстояния от измерительной базы до рабочего инструмента, установленного заданным образом для обработки заготовки, при различных фактических размерах заготовки (в пределах допуска на ее изготовление) получаются разными.

Примером может служить заготовка для фрезерования паза (рисунок 5.2). 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.

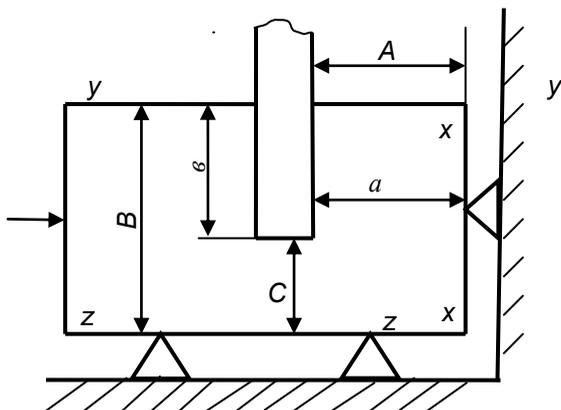


Рисунок 5.2 – Схема фрезерования паза

Следовательно, и 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 базой* (плоскостью $z-z$).

Другой пример: деформация детали от усилия резания (при обработке вала в центрах точением), в результате которой обработанная поверхность имеет бочкообразный вид (рисунок 5.3).

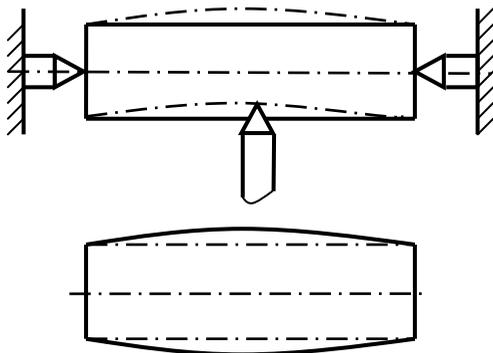


Рисунок 5.3 – Виды деформации детали от усилия резания

Предельные погрешности базирования во многих случаях можно определить геометрическим расчетом с учетом схемы установки детали для обработки и заданных допусков.

Суммарная погрешность механической обработки зависит от первичных погрешностей, возникающих в результате действия каждого из факторов, влияющих на точность обработки. Все погрешности по характеру проявления подразделяются на систематические и случайные.

К *систематическим* можно отнести погрешности:

- связанные с определенной настройкой станка;
- связанные с размерным износом инструмента (будет изменяться по мере роста износа);
- вызванные температурной деформацией станка и т. д.

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 для каждой детали невозможно определить заранее или спрогнозировать. К ним относятся погрешности от упругих деформаций (в системе станок – приспособление – инструмент – деталь): от нестабильности установки детали на станке, от других факторов.

В результате действия случайных факторов действительные размеры детали распределяются в пределах некоторой амплитуды погрешности, оценка которой производится методами математической статистики и теории вероятности. Кривая нормального распределения фактических размеров детали выглядит, как показано на рисунке 5.4.

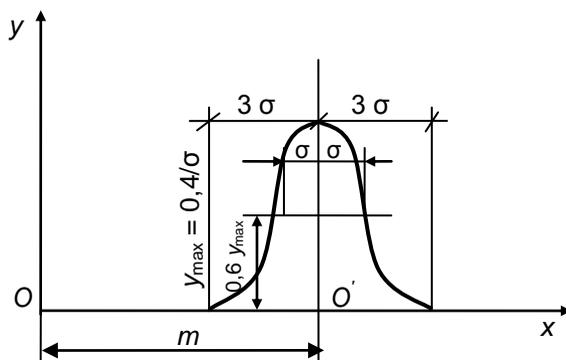


Рисунок 5.4 – Кривая нормального распределения фактических размеров детали

На рисунке 5.4 приняты традиционные обозначения:

x – размер детали;

y – функция плотности размеров;

$m(x)$ – математическое ожидание (среднее арифметическое размера);

$$m(x) = \sum_{i=1}^N P_i x_i,$$

где P_i – вероятность появления x_i ;

x_i – значение случайной величины;

$\sigma(x)$ – среднее квадратическое отклонение;

$$y(x) = \sqrt{D(x)},$$

$D(x)$ – дисперсия случайной величины;

$$D(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m(x))^2,$$

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.

Обеспечение качества поверхностей 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).

По стандарту (ГОСТ 2789–73) шероховатость характеризуют следующими параметрами:

R_a – среднее арифметическое значение отклонения профиля;

R_z – высота неровностей профиля (по десяти точкам);

S_m – средний шаг неровностей;

S – средний шаг местных выступов;

t_p – относительная опорная длина профиля (p – значение уровня сечения профиля);

R_{\max} – наибольшая высота профиля.

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. 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 5.5). 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.

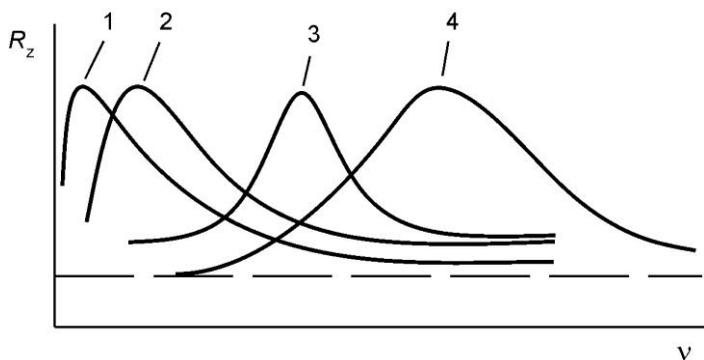


Рисунок 5.5 – Влияние скорости резания на шероховатость обработанной поверхности различных материалов:
1 – медь; 2 – сталь; 3 – легированная сталь; 4 – пластмасса

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:

- а) *упрочнение (наклеп)* в результате силового воздействия резания;
- б) *разупрочнение* (снятие наклепа) в результате нагрева.

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 режимов резания и геометрических параметров режущего инструмента. На рисунке 5.6 представлено влияние скорости резания на твердость поверхностных слоев различных сталей. Если в металле при механической обработке не происходит структурных превращений, то увеличение скорости резания снижает эффект упрочнения из-за нагрева обрабатываемой поверхности (кривая 1). 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.

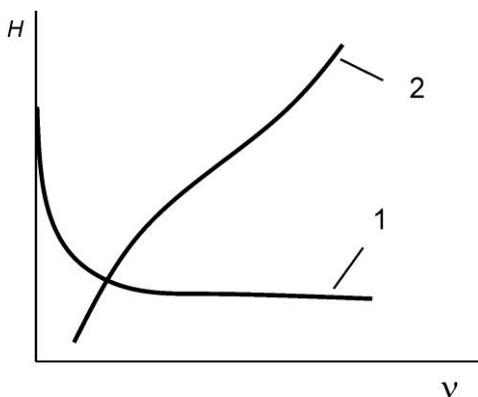


Рисунок 5.6 – Влияние скорости резания при точении на твердость стали:
1 – 30ХГС; 2 – У10

Подбирая способы обработки, режимы резания и охлаждения, 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 5.3 приведены характеристики наклепанных слоев при различных методах механической обработки.

Таблица 5.3 – 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.

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, 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 сочеталось с достаточно высоким сопротивлением хрупкому разрушению.

К методам упрочнения относятся (помимо собственно легирования) термическая, химико-термическая и термомеханическая обработка, пластическое деформирование.

Термическая обработка (ТО) является самым простым и распространенным методом упрочнения, влияющим на структуру и свойства поверхностных слоев металлических (в основном стальных) изделий. *Главными факторами ТО* являются *температура нагрева и скорость охлаждения*.

Объемная закалка – основной вид упрочняющей термической обработки конструкционных и инструментальных 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 интервале 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 кипящие 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 различны (таблица 5.4), поэтому выбор конкретной закалочной среды определяется видом изделия.

В частности, воду с температурой 18–25 °С используют в основном при закалке деталей простой формы и небольших размеров, выполненных из углеродистой стали. Детали наиболее 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 широко применяют водные растворы поверхностно-активных веществ и синтетических полимеров. Объемная закалка повышает прочность сталей: углеродистых – в 1,5–2 раза, легированных – в 2–3 раза, твердость – до 40–55 HRC (по Роквеллу). Ее используют для упрочнения отливок, поковок, штамповок, проката, сварных элементов.

Таблица 5.4 – Скорость охлаждения стали в различных закалочных средах

Среда	Скорость охлаждения (°C/с) в интервале температур	
	650–550 °C	300–200 °C
Вода при температуре, °C:		
18	600	270
25	500	270
50	100	270
75	30	200
Мыльная вода	30	200
Эмульсия масла в воде	70	200
Вода, насыщенная углекислотой	150	200
10%-ный водный раствор (при 18 °C):		
едкого натра	1200	300
поваренной соли	1100	300
соды	800	270
5%-ный раствор марганцовокислого калия	450	100
Керосин	180	60
Масло промышленное	120	25
Спокойный воздух	3	1
Сжатый воздух	30	10

Поверхностная закалка. Ее особенность состоит в том, что упрочняется только неглубокий (толщиной от 0,2 до 15 мм) поверхностный слой материала деталей, а сердцевина остается вязкой и пластичной. Такое сочетание обеспечивает повышение износостойкости (в 2 раза) и стойкость к динамическим нагрузкам.

Если детали испытывают усталостное изнашивание, ограничиваются толщиной до 3 мм, при высоких контактных нагрузках – до 10–15 мм.

Закалку с индукционным нагревом (нагревом 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 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 (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.

В последние годы расширяется применение индукционного нагрева (ИН) при обработке тяжело нагруженных деталей машин. ИН используют:

- 1) для поверхностной закалки деталей;
- 2) нагрева под пластическую деформацию при упрочнении деталей;
- 3) интенсификации процессов химико-термической обработки (цементации и нитроцементации).

При закалке ИН отсутствуют окисление и обезуглероживание поверхности стальных деталей (по сравнению с печной термической обработкой), снижаются термические деформации, что позволяет упрочнять ряд деталей без последующей шлифовки.

О масштабах применения ИН свидетельствуют следующие примеры. На МАЗе (1998 г.) общая мощность ВЧ-генераторов для ИН составляла 12280 кВт, с помощью которых обрабатывали более 850 наименований деталей автомобилей. Из них 250 – под закалку, 400 – под горячее деформирование, 100 – под напайку (и отпайку) твердосплавных пластин.

Наибольший эффект упрочнения ИН дает для деталей простой формы, поскольку в этом случае термические деформации имеют минимальную величину. Для сведения, из упомянутых 250 деталей имеют форму, %:

70 – простую цилиндрическую;

12 – сферическую;

8 – плоскую;

6 – сложную (с зубчатыми венцами, шлицевыми поверхностями, галтелями).

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 напряжения, чем при обычной объемной закалке.

Закалка в электролите основана на том, что при пропуске тока через электролит (5–10%-ный раствор кальцинированной соды) на катоде (детали) образуется газовая рубашка водорода. Ток при этом сильно 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* осуществляется 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 изделия.

Лазерной закалкой можно упрочнять в различных режимах и тонкие (до 0,2 мм), и сравнительно толстые (до 3 мм) слои как на небольших участках изделий, так и на поверхностях большой площади. При этом наряду с упрочнением можно изменять шероховатость изделий, 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 °С/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 пользуются пучками электронов с различной энергией (*электронно-лучевая закалка*). Лазерное упрочнение сочетают с ультразвуковой обработкой или с последующей обработкой холодом (*лазерно-криогенное упрочнение*, таблица 5.5).

Таблица 5.5 – 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 5.6 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 5.6 – 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 тепловая обработка металлических изделий в химически активных средах для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев. Она позволяет повысить твердость, износостойкость, усталостную и контактную выносливость, а также коррозионную стойкость. Возможности ХТО выше, чем термической обработки, поскольку ХТО меняет не только структуру, но и химический состав поверхностных слоев.

Главными факторами ХТО являются *температура* и *время термообработки*, а также *концентрация* активного химического компонента на поверхности стальной детали.

Образование модифицированного поверхностного слоя деталей протекает в несколько стадий. Первая стадия – *адсорбция модифицирующих атомов* на обрабатываемой поверхности. Эти атомы должны быть реакционно-способными, и поэтому необходима диссоциация соединений в окружающей деталь газовой или жидкой среде. В случае ионной имплантации (облучения поверхности потоком ионов) активные ионы модификатора внедряются на некоторую глубину в поверхностный слой изделия.

По мере накопления адсорбированных атомов на обрабатываемой поверхности на ней создается градиент их концентрации, обуславливающий *диффузию* этих *атомов* в глубь материала. Кинетика их диффузии определяется тремя главными факторами: температурой, продолжительностью процесса и начальной концентрацией диффундирующих атомов в поверхностном слое.

В случае, если диффузия модифицирующего элемента в обрабатываемый материал не ускоряется внешними факторами, изменение фазового состояния и структуры поверхностного слоя изделия может быть предсказано в соответствии с известной диаграммой состояния «обрабатываемый материал – модифицирующий элемент». Зная температуру и содержание диффундировавшего элемента на различных глубинах, а также предельные равновесные растворимости этого элемента в обрабатываемом слое, можно прогнозировать образование той или иной фазы в металле при данной температуре. Охлаждение диффузионной зоны может привести к фазовым превращениям, аналогичным тем, которые происходят согласно диаграмме состояния сплава при его охлаждении.

Однако возможны случаи, когда процесс диффузионного насыщения протекает 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). Лазерный или электронно-лучевой нагрев интенсифицирует диффузию, обеспечивая недостижимые традиционными способами концентрации модифицирующих элементов в поверхностном слое.

Самые распространенные методы ХТО: *цементация, азотирование, нитроцементация, хромирование, алитирование и борирование.*

Цементация – 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. Термическая обработка изделий после цементации служит для исправления структуры, измельчения зерна и повышения комплекса механических свойств поверхностного слоя.

Газовую цементацию наиболее широко применяют для изделий 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 цементованного слоя 0,5–2,0 мм. В зависимости от толщины слоя время обработки изменяется в интервале от 4 до 15 часов.

Цементация обеспечивает (по сравнению с закалкой ТВЧ) повышение предела выносливости в 3 раза, износостойкости в 1,5–2 раза, $\text{HRC} \leq 65$ МПа.

Азотирование – 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).

Азотированию подвергают детали из среднеуглеродистых легированных сталей. Перед этим для них назначают улучшение и чистовую обработку, после азотирования изделия шлифуют или полируют. Можно азотировать только часть изделия, изолировав остальную его поверхность защитным покрытием (обычно из олова).

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.

В целом азотирование используют реже, чем цементацию, хотя износостойкость, твердость и стойкость к отпуску сталей при этой операции выше. Это обусловлено малой толщиной упрочненного слоя (до 0,2–0,5 мм) и большой длительностью процесса. Для ускорения процесса осуществляют двухступенчатую выдержку деталей при различных температурах в средах, содержащих аммиак и углеводороды, а также чередование азотирующей среды с инертной при различных температурах выдержки. Для этого также используют ионную имплантацию азота.

Нитроцементация – процесс диффузионного насыщения стали углеродом и азотом из газовой фазы (обычно газовой среды, применяемой при цементации, с незначительным 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 нитроцементированного 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 %.

Нитроцементацию используют для тех же целей, что и обычную цементацию, при обработке стальных деталей сложной конфигурации, которые при обычной цементации подвержены короблению (таблица 5.7).

Таблица 5.7 – 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	–

Цианирование 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, проводимое при 570 °С, часто выделяют в особый вид химико-термической обработки, называемый *карбонитрацией*. При карбонитрации происходит диффузионное насыщение стали азотом и углеродом из расплавов карбонатов и цианатов (например, смеси KCNO , NaCN и Na_2CO_3 или NH_2CO и Na_2CO_3).

Среднетемпературное цианирование проводят при температуре 820–860 °С в расплаве, содержащем соли NaCN , NaCl и Na_2CO_3 , в течение 0,5–1,5 ч. Толщина диффузионного слоя достигает 0,15–0,35 мм, содержание азота и углерода составляет соответственно до 1,2 и 0,8 %.

Высокотемпературное цианирование выполняют для получения диффузионных слоев толщиной до 2 мм. Температура процесса при этом составляет 930–950 °С, что способствует ускорению диффузии азота и углерода в сталь. Расплав готовят на основе смеси солей NaCN , BaCl_2 и NaCl , а продолжительность выдержки изделий составляет 1,5–6 ч.

Диффузионная металлизация включает группу методов, при осуществлении которых поверхностный слой детали насыщается одним или несколькими металлами. Такое насыщение проводится 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.

Алитирование (диффузионное насыщение алюминием) применяют для повышения жаростойкости и коррозионной стойкости деталей топливно-энергетического оборудования из углеродистых сталей. Процесс осуществляют в основном в порошковых смесях (порошок металлического алюминия с его оксидом и хлористым аммонием), расплаве алюминия или при отжиге стальной детали с алюминиевым покрытием. Температура процесса – от 720 °С (в расплаве) до 1050 °С (в порошковой смеси), длительность – от 15 мин до 12 ч в зависимости от требуемой толщины алитированного слоя (до 1 мм при содержании алюминия до 30 %). Структура слоя – твердый раствор алюминия в α -железе.

Диффузионное хромирование обеспечивает повышение коррозионной стойкости, окислительной стойкости изделий, а при содержании углерода в стали 0,3–0,4 % – их твердости и износостойкости. Хромирование используют для деталей из сталей любых марок. Процесс осуществляется 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 (0,025–0,03 мм) и переходной слой, обогащенный углеродом. Твердость поверхностного слоя изделий достигает 1200–1300 HV при толщине до 0,3 мм. Хромирование назначают при обработке деталей пароводяной арматуры, работающих в условиях интенсивного изнашивания в агрессивных средах, а также инструмента.

Как уже отмечалось, некоторые металлы и неметаллы вводят в поверхностный слой стальных изделий комплексно. К таким методам их диффузионного насыщения относят *хромтитанирование, хромосилицирование, хромоалитирование, борохромирование* и *боросульфидирование, карбованадийтитанирование, цирконититанирование* 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 применяется в машиностроении ограниченно.

Применение ИН существенно интенсифицирует ХТО. При химикотермической обработке стальных деталей резко сокращается время их нагрева до температуры насыщения (при печном нагреве – часы, при ИН – секунды), ускоряется процесс диффузии (за счет активизации поверхностных реакций, создания повышенного градиента концентрации диффундирующего элемента в поверхностных слоях деталей, а также за счет измельчения зерен и увеличения протяженности границ зерен аустенита), например, при цементации толщина диффузионного слоя в 3–5 раз превышает толщину слоя при печном нагреве. Сдерживающим фактором является отсутствие централизованного изготовления как универсального, так и специального оборудования для обработки ИН деталей машиностроения. Каждое предприятие изготавливает их самостоятельно.

Высокоэнергетические методы химического модифицирования поверхностных слоев стальных деталей. Наиболее перспективными методами модифицирования поверхностных слоев деталей являются ионно-диффузионное модифицирование в тлеющем разряде, ионная имплантация (ионное легирование), а также комбинации ионно-плазменных методов с лазерной или электронно-лучевой обработкой.

Пример *ионно-диффузионного модифицирования – ионное азотирование.* Оно реализуется в тлеющем разряде постоянного напряжения в среде азота или аммиака. Ионы азота, ударяясь об обрабатываемую стальную деталь, являющуюся катодом, осаждаются на ней, а затем диффундируют вглубь, так как поверхность катода разогревается при бомбардировке ионами с энергией в несколько сот электрон-вольт до 500–600 °С. При соударении ионов с поверхностью детали происходит ее очистка от адсорбированных и оксидных пленок, препятствующих проведению обычного азотирования некоторых сталей, например коррозионностойких. Длительность ионного азотирования сокращается по сравнению с обычным, температура процесса снижается, а механические свойства поверхностного слоя повышаются.

Кроме азотирования ионно-диффузионными методами, могут быть осуществлены *цементация, силицирование, борирование и комплексное насыщение* (карбонитрирование и т. д.) поверхностных слоев стальных изделий *модифицирующими элементами*.

Ионная имплантация основана на том, что при повышении энергии бомбардирующих ионов последние проникают внутрь кристаллической решетки металла, легируя поверхностный слой и упрочняя его за счет искажения 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 изделий 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 5.7 представлены результаты влияния азотной имплантации (энергия ионов 150 кэВ) на усталостную долговечность, которая показывает существенное увеличение предела выносливости углеродистой стали.

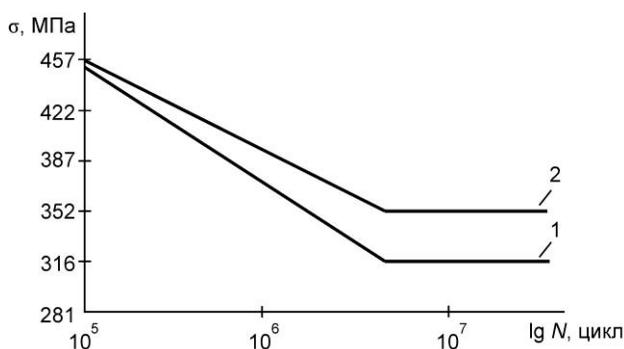


Рисунок 5.7 – Влияние имплантации азотом на усталостную долговечность стали: 1 – без имплантации; 2 – после имплантации

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 относят лазерное поверхностное и электронно-лучевое легирование.

Лазерное поверхностное легирование характеризуется, как и лазерная закалка, интенсивным кратковременным тепловым воздействием на поверхностный слой изделия. Главными параметрами являются плотность энергии лазерного излучения, подводимой к поверхности, и длительность облучения. При лазерном легировании тепловое воздействие сочетается с подведением к поверхности изделия 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 5.8).

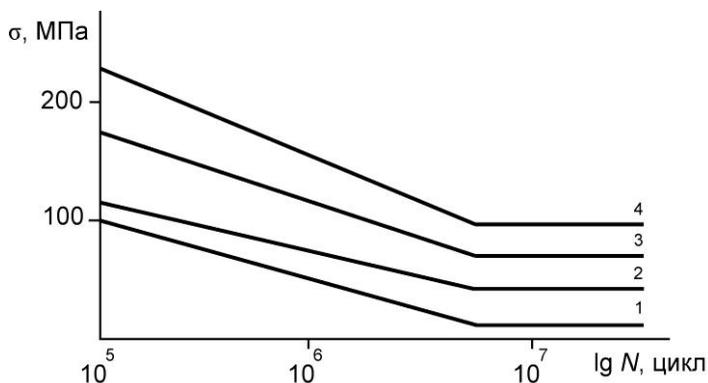


Рисунок 5.8 – Влияние вида упрочняющей обработки на кривые усталости образцов из стали 45:

- 1 – без обработки; 2 – упрочнение роликом; 3 – электромеханическая обработка; 4 – лазерное упрочнение

Лазерное легирование углеродистых сталей позволяет получать поверхностные слои изделий 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 изделий очень высоки, что обуславливает перспективы их широкого внедрения в машиностроение.

Механическая обработка пластическим деформированием деталей. 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 цементованных 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 резуль-

тате наклепа способствует уменьшению взаимного внедрения и контактного схватывания, что увеличивает износостойкость трущихся поверхностей.

С помощью поверхностного пластического деформирования (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 способы обработки ППД и устройства для их осуществления. Обработку производят с использованием универсальных и специальных станков, станков с ЧПУ, полуавтоматов и автоматов.

Способы обработки ППД можно разделить на две основные группы:

- а) *динамическое упрочнение*;
- б) *обработка с использованием сил трения между инструментом и деталью*.

Дробеструйная обработка представляет собой динамическое упрочнение пластическим деформированием наружной поверхности детали под действием дроби, 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 долговечность (циклическая):

- рессор – в 2–7 раз;
- пружин – в 3–10 раз;
- зубчатых колес (после закалки ТВЧ) – в 8–12 раз;
- 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 изделия 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 не-

обходимая глубина наклепа (шероховатость поверхности при этом возрастает). *Упрочняюще-сглаживающая обкатка* наряду с повышением сопротивления усталости материала обеспечивает снижение параметров исходной шероховатости поверхности на 15–20 %.

При упрочняющей обкатке повышение твердости поверхностного слоя достигает 24–40 %, а глубина наклепа составляет 0,02–0,04 диаметра детали, при сглаживающих режимах она не превышает 0,01 диаметра детали.

Обкатку используют для упрочнения валов, осей, пальцев, шпилек, зубчатых колес и других деталей. Накатывают цилиндрические поверхности, галтели, канавки, впадины зубьев и шлицев, торцовые 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 5.9, а) обрабатываются внутренние 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 роликами (рисунок 5.9, б) проводят с помощью специальных приспособлений, которые оснащают одним или несколькими накаточными роликами. Эффективность обкатки также растет с уменьшением исходной твердости детали. Отметим, что размер детали меняется незначительно (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. Долговечность (циклическая) растет:

– штоков – в 3–4 раза;

– болтов, шпилек (обкатка резьбы) – в 2 раза.

Такого же эффекта можно добиться с помощью *алмазного выглаживания* (рисунок 5.9, 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.

Выглаживание используют как для наружных, так и для внутренних поверхностей вращения. При этом усилия, прикладываемые к детали, находятся в пределах 50–300 Н, что позволяет применять данный метод для тонкостенных и нежестких деталей. Им можно обрабатывать материалы любой твердости, поддающиеся пластическому деформированию (цветные металлы, а также стали, закаленные до твердости 60 HRC и выше, цементованные и азотированные, покрытые электролитическим хромом или другими твердыми покрытиями).

Выглаживание обычно осуществляют за один проход, при этом уменьшение подачи повышает эффективность обработки (особенно по шероховатости поверхности). Эффективность второго прохода не превышает 10–20 % первого.

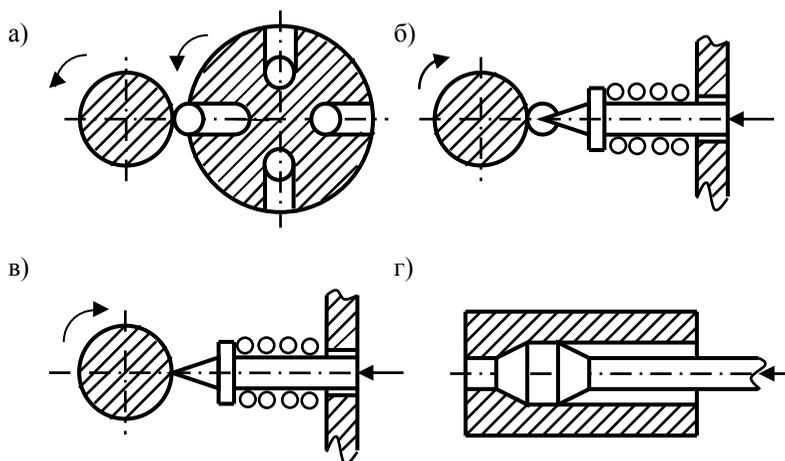


Рисунок 5.9 – Принципиальные схемы механического упрочнения деталей:

а – центробежно-шариковый наклеп; *б* – обкатывание роликами;
в – алмазное выглаживание; *г* – раскатывание

С увеличением силы, с которой рабочее тело (шарик, ролик, алмазный наконечник) прижимают к обрабатываемой поверхности, твердость упрочненного слоя возрастает до определенного предела. Для каждого способа обкатки существует предельная величина силы, выше которой происходит снижение твердости обработанного материала. Как видно из рисунка 5.10, при алмазном выглаживании максимальное повышение твердости выше и достигается при значительно меньших значениях нормальной силы, чем при обкатывании шарами.

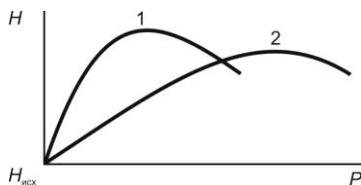


Рисунок 5.10 – Зависимость твердости упрочненного слоя от силы давления инструмента:
1 – алмазное выглаживание;
2 – обкатка шариками

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.

Обработку внутренних поверхностей отверстий (например, отверстий пластин цепей) осуществляют раскатыванием (рисунок 5.9, з) (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 поверхностных слоев возрастает в 2 раза.

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 5.11). При непо-

движном соединении детали сохраняют неизменное относительное положение, при подвижном имеют возможность заданного перемещения. В свою очередь, неподвижные и подвижные соединения могут быть *неразъемными* или *разъемными*.

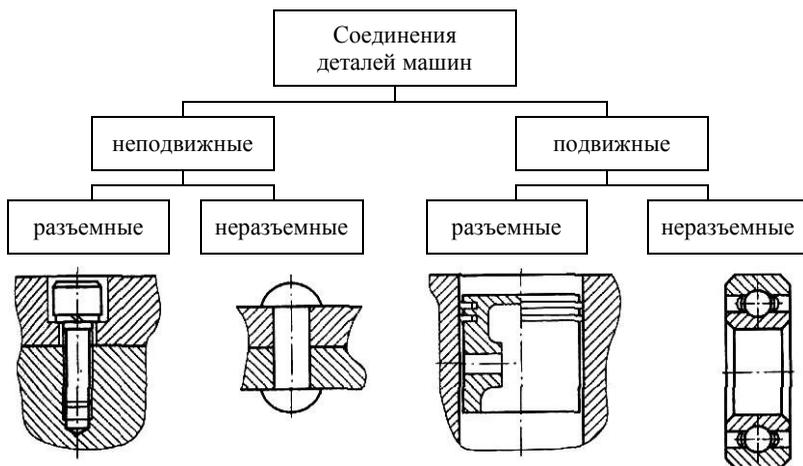


Рисунок 5.11 – Основные виды соединений деталей машин

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.).

При 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 выполнение 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 исполнительные поверхности в своем относительном движении и в статичном положении не выходили за пределы установленных допусков при сборке и эксплуатации.

Сборка бывает окончательная и предварительная. При *окончательной сборке* изготовленные машины после сборки, наладки и испытаний в собранном виде отправляют потребителю (возможен только частичный демонтаж для перевозки по железной дороге).

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.).

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. Имеется несколько методов сборки, которые по-разному обеспечивают заданную точность замыкающего звена сборочной единицы:

- 1) сборка с применением полной, неполной или групповой взаимозаменяемости;
- 2) сборка с пригонкой;
- 3) сборка с регулированием.

Размерной цепью называют совокупность размеров, участвующих в решении поставленной задачи и образующих замкнутый контур. Размеры деталей, включаемые в размерную цепь, называют звеньями, а звено (т. е. размер), которое является исходным при постановке задачи и последним при ее решении, – замыкающим звеном.

Например, при решении задачи обеспечения натяга заданной величины 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.

Упомянутые методы сборки имеют ряд особенностей.

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 экономично в условиях достижения высокой точности при малом числе звеньев размерной цепи, подлежащих сборке. К достоинствам можно также отнести минимальную трудоемкость сборочных работ и возможность использования малоквалифицированной рабочей силы.

Недостатками метода являются очень жесткие допуски размеров деталей, которые требуют совершенного оборудования, точных приспособлений и т. д. Этот метод экономически оправдан в массовом или крупносерийном производстве.

По методу неполной взаимозаменяемости сборка производится 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 сборка производится так, что требуемая точность замыкающего звена достигается только в пределах специально подобранных групп деталей. Детали изготавливают по увеличенным допускам (в силу технических или других причин), а необходимые зазоры или натяги достигаются подбором охватывающей или охватываемой детали. Этот метод применяют для достижения высокой точности замыкающих звеньев малошвенных размерных цепей. При этом необходима четкая организация сортировки и маркировки деталей по группам, а также их хранения. Дополнительные затраты на предварительную сортировку окупаются экономией при изготовлении деталей по широким допускам.

По методу сборки с регулированием необходимые посадки в сопряжении достигаются за счет введения в него специальной регулировочной детали (шайбы, втулки, прокладки, муфты, клиньев и др.). Этот метод имеет широкое применение, поскольку позволяет получать высокую точность сборки деталей, имеющих широкие допуски. Его использование целесообразно при соединении деталей с базированием по плоскостям (привалочным плоскостям корпусных деталей, рамных конструкций и др.), а также при ремонте для восстановления работоспособности узлов.

По методу сборки с пригонкой детали по месту заданная точность замыкающего звена (в размерной цепи с расширенными допусками ее звеньев) достигается изменением величины одного звена путем пригонки деталей. Пригонка выполняется удалением слоя материала путем механической обработки детали по месту. Метод используют в единичном и мелкосерийном производстве.

5.7 Методы снижения напряжений в деталях и конструкциях

Как уже отмечалось, различные виды внешних нагрузок (постоянные, переменные, циклические) вызывают в деталях, элементах и конструкциях машины напряжения, которые существенно влияют на их работоспособность (вплоть до разрушения).

Различают так называемые *номинальные* напряжения, оказывающие влияние на всю деталь или конструкцию, и *местные* напряжения, возникающие в зонах соединения деталей и в местах контакта сопряженных деталей. Местные напряжения обусловлены локальными причинами, включая концентрацию нагрузок в отдельных зонах деталей и сопряжений (в частности, в зоне резкого изменения формы детали, в прессовой посадке), а также неоднородность структуры материала детали и др.

Соответственно различают и методы снижения внутренних напряжений, которые затрагивают целиком элемент конструкции или же отдельную локальную зону элемента или детали.

Кинетика накопления усталостных напряжений, приводящих, в конечном счете, к отказу, зависит как от величины, так и от равномерности распределения нагрузок. Из всех основных видов нагружения, действующих при различных видах внешних нагрузок на рабочие органы и узлы машины (растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб, кручение), наибольшую неравномерность распределения номинальных внутренних напряжений (как по длине, так и по сечению детали) вызывают изгиб и кручение (рисунок 5.12, а–г).

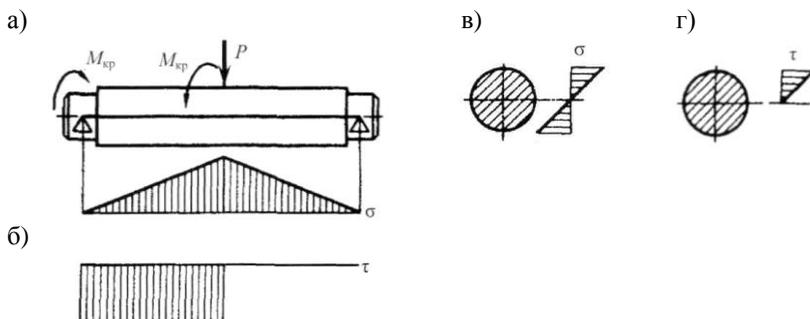


Рисунок 5.12 – Распределение номинальных напряжений изгиба и кручения по длине и сечению вала круглого поперечного сечения

В настоящее время разработан и используется на практике ряд методов снижения или выравнивания номинальных внутренних напряжений, обусловленных стационарно действующими внешними нагрузками, к которым относятся:

1) замена элементов конструкций, работающих на изгиб, элементами, работающими на растяжение или сжатие, что достигается применением предварительно напряженных элементов, например (рисунок 5.13), шпренгельных и предварительно напряженных балок, колонн с растяжками и др.;

2) оптимизация формы опасных сечений элементов, работающих на растяжение или сжатие; это достигается за счет подбора сечения элементов с учетом показателя W_x/Q (в таблице 5.8 представлены величины этого показателя для различных форм сечения стандартных профилей, которые различаются между собой по эффективности использования при изгибе на порядок);

3) уменьшение внешней нагрузки за счет ее распределения на несколько элементов или за счет увеличения площади опасного сечения элемента (например, использование косозубого зацепления вместо прямозубого в зубчатых передачах, применение шлицевых соединений вместо шпоночных и

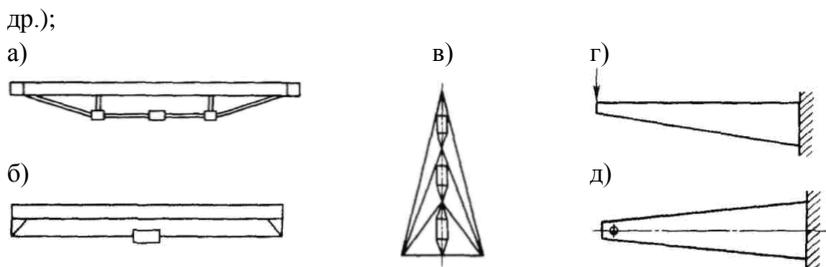


Рисунок 5.13 – Примеры выравнивания и уменьшения номинальных напряжений: *а* – шпренгельная балка; *б* – предварительно напряженная коробчатая балка (с нижней винтовой стяжкой); *в* – колонна с растяжками; *г* – балка равного сопротивления с переменной высотой сечения; *д* – то же с переменной шириной сечения

4) создание в элементах начальных напряжений обратного знака, компенсирующих напряжения от внешней нагрузки, например, создание в детали напряжений сжатия (при ее изготовлении) для эксплуатации в условиях растяжения;

5) обеспечение равнопрочности элементов по всей длине за счет подбора их формы, например, применение балок равного сопротивления с переменной высотой или с переменной шириной.

Таблица 5.8 – Сравнение различных форм сечений по показателю W_x/Q

Вид сечения	W_x	Q	W_x/Q
Круг диаметром 60 мм	21,6	22,19	0,97
Квадрат 52×52	24,8	22,05	1,13
Уголок равнобокий № 12,5 (125×125×12)	47,2	22,7	2,08
Уголок неравнобокий № 18/11 (180×110×10)	78,6	22,2	3,54
Двутавр № 20 а	203	22,7	8,96
Швеллер № 22 а	212	22,6	9,37
Двутавр широкополочный № 24 Б	233	22,1	10,50
Швеллер облегченный № 30	204	17,6	11,60
Двутавр облегченный № 30	215	18,2	11,80

Местные напряжения также могут стать причиной разрушения деталей и элементов конструкций машины, поскольку усталостные трещины возникают и накапливаются именно в местах концентрации напряжений. Причины концентрации местных напряжений могут быть самыми различными, в том числе неоднородность материала детали, резкое изменение формы, концентрация нагрузки в локальной зоне и др.

Наиболее опасными местами детали и сопряжений являются впадины зубьев и резьб, галтелей, шпоночных пазов, шлицев, поверхности с острыми углами и др. Кроме того, опасными являются граничные зоны деталей в

прессовых посадках, что связано с деформациями деталей в местах посадки и напряжениями растяжения и сжатия в этих зонах.

Концентрация нагрузки, вызывающая местные напряжения, связана, как правило, с технологическими дефектами, возникающими при изготовлении детали, и эксплуатационными причинами (упругие деформации и перекосы при нагружении, неравномерное изнашивание сопряженных поверхностей и др.). В частности, при сжатии концентрация нагрузки имеет место в местах зацепления зубчатых передач различного типа, в местах контакта различных опорных элементов с основой (колес, роликов, катков и др.), в подшипниках качения и др. При растяжении она возникает в различных соединениях (сварных, заклепочных, резьбовых). При изгибе она, как правило, обусловлена деформацией деталей и наблюдается в зацеплениях зубчатых колес при их перекосах, а также в зонах контакта деформированных элементов (валов, валиков и др.) с сопрягаемыми деталями.

Как уже отмечалось, причиной концентрации местных напряжений могут быть неоднородности состава и структуры материала деталей, что особенно характерно для сварных соединений. Здесь концентраторами местных напряжений могут быть как дефекты сварки и неоднородность состава за счет выгорания легирующих добавок в зоне шва, так и структурные изменения в металле околошовной зоны, в частности, на границе закаленной и не закаленной областей сварных соединений.

Для снижения местных напряжений используют ряд методов:

- 1) замена элементов, являющихся концентраторами напряжений;
- 2) изменение формы деталей за счет оптимизации конфигурации опасных сечений;
- 3) устранение острых углов в деталях и конструкциях (в частности, за счет скругления впадин зубьев в зубчатых и других передачах);
- 4) устранение резких переходов и изменение конфигурации переходных зон в деталях:
 - а) сближение размеров различных элементов деталей;
 - б) увеличение радиуса галтелей;
- 5) смещение места концентрации нагрузки из зоны опасного сечения детали в другую зону.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Надежность, заложенная на этапах проектирования и изготовления, должна 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 показателей машины и, наконец, к полному отказу машины.

Как отмечалось, 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 непосредственное соприкосновение (контакт) с разрабатываемым грунтом или обрабатываемыми (перерабатываемыми) материалами, а также детали ходовых частей машин.

Например, в суглинистых грунтах износ крайних ножей отвалов мощных бульдозеров достигает 50 мм за 20 часов работы (при скорости изнашивания до 260 мкм/ч). Между тем при износе ножа уже на 15 мм общее сопротивление грунта резанию увеличивается на 50 %, т. е. растет время на выполнение рабочих операций, падает производительность и увеличивается энергоемкость резания. Износ рабочих органов машин в основном связан с абразивностью грунтов, которая растет с увеличением содержания частиц SiO_2 , их размеров и закрепленности. С ростом плотности грунтов износ существенно увеличивается. Наибольшую абразивность имеют мерзлые грунты. Так, в мерзлом грунте износ деталей рабочего оборудования возрастает в 2 раза.

Абразивному изнашиванию подвержены и многие детали машин, образующие пары трения, в том числе подшипники, оси и валы, опорные катки, зубчатые передачи, а также другие сборочные единицы и сопряжения, плохо защищенные от пылевидного абразива. Наиболее интенсивно изнашиваются шейки валов в местах контакта с подшипниками. Допускаемый износ шейки вала составляет:

- для подшипников качения – $[L] = 0,02 \dots 0,2$ мм;
- для подшипников скольжения – $[L] = 0,15 \dots 2,0$ мм.

В строительных машинах часто разрушаются металлоконструкции рам, стрел, рукоятей, ковшей, отвалов и др. Наиболее частой причиной разрушения сварных швов с последующим распространением трещин на основной металл являются внутренние напряжения или дефекты самого шва.

Практически любое сопряжение в процессе эксплуатации теряет свои первоначальные (исходные) показатели, в том числе крепежные соединения, шлицевые и шпоночные соединения, муфты, силовые передаточные механизмы (зубчатые передачи, червячные передачи, цепные передачи, ременные передачи), муфты сцепления, дисковые, конические и ленточные муфты, бортовые фрикционы, ходовое устройство, грузовые гибкие элементы и т. д.).

В таблице 6.1 представлены сведения по отказам основных систем и агрегатов машин. Эти результаты подтверждают наибольшее число отказов (по износу) рабочих органов, ходовой части, привода и узлов трения.

*Таблица 6.1 – 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
Металлоконструкция	3754	10,77
Гидросистема	3095	8,88
Электрооборудование	1246	3,58
Трансмиссия	1178	3,38
Пневмосистема	387	1,11
Двигатель	147	0,42
В с е г о	34856	100

* В организациях КППСУП «Гомельоблдорстрой» за 1998–2003 гг.

С учетом всего перечисленного очень важно поддерживать в период эксплуатации запланированный уровень надежности.

6.1 Основные направления повышения надежности на этапе эксплуатации

На третьем этапе – этапе эксплуатации – сохранение (а в некоторых случаях и повышение) надежности, заложенной при проектировании машины и реализованной при изготовлении, осуществляется как организационными мероприятиями, так и технологическими методами.

К организационным мероприятиям относятся следующие:

- 1) контроль соответствия технических характеристик машин режимам их эксплуатации, в том числе контроль за использованием машин по назначению;
- 2) контроль исполнения системы планово-предупредительного ремонта машин;
- 3) оптимизация организации технического обслуживания и ремонта машин, включая применение современных методов и средств технической диагностики;
- 4) совершенствование организации ремонта типовых деталей и механизмов машин;
- 5) расширение сервисного обслуживания;
- 6) повышение квалификации и специальное обучение обслуживающего персонала.

Обеспечение или повышение надежности машин путем восстановления деталей машин, упрочнения и повышения их износостойкости осуществляется различными *технологическими приемами*. К ним относятся:

- 1) *методы удаления материала* с поверхности детали путем механической обработки посредством обточки, фрезерования, шлифования;
- 2) *методы наращивания* на дефектную (изношенную) поверхность детали другого материала путем наплавки металлических материалов, напыления металлических и полимерных покрытий, электрохимического осаждения металлических покрытий;
- 3) *методы перемещения материала* детали с одного участка к другому посредством пластической деформации с помощью осадки, раздачи, вытяжки и накатки;
- 4) *методы восстановления целостности* тела детали сваркой, пайкой и склеиванием;
- 5) *методы восстановления относительного положения* поверхностей детали в пространстве путем статического нагружения, чеканки, местного нагрева (локального).

6.2 Совершенствование организации технического обслуживания и ремонта 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. Соблюдение требований эксплуатационной документации во многом зависит от подготовки и квалификации обслуживающего персонала.

Любая машина в процессе эксплуатации утрачивает свои функциональные свойства и качественные показатели. Поэтому бессмысленно пытаться достичь абсолютной надежности ее элементов. Гораздо более экономичной является реализация оптимальной надежности. Еще при проектировании машины следует выявить 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). Например, если стоимость машины мала по сравнению с расходами на ремонт, то целесообразно выпустить большее количество новых машин, что снизит эксплуатационные расходы. Если же ремонт стоит дешевле хранения запасных машин, то следует больше средств выделять на ремонт.

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.

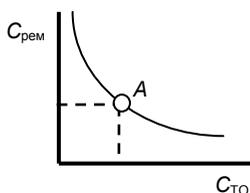


Рисунок 6.1 – Соотношение стоимости техобслуживания и стоимости ремонта машин

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): $C_{ТО} \approx C_{рем}$.

Под термином *техническое обслуживание* имеется в виду комплекс работ для поддержания исправности или работоспособности машины.

Ремонтом называют комплекс работ для восстановления исправности или работоспособности машин.

Научно обоснованная организация системы технического обслуживания и ремонта ставит конечной целью обеспечение запланированных на этапе проектирования показателей надежности путем проведения комплекса организационно-технических мероприятий при минимальных затратах энерго-, трудо- и материальных ресурсов.

При рассмотрении вопросов, связанных с совершенствованием технического обслуживания, следует выявить оптимальное сочетание таких ее характеристик, как периодичность и объем профилактических работ, число специалистов и время проведения с учетом стоимости технического обслуживания и числа отказов после проведения этих работ.

Организация работ по поддержанию работоспособности машин планируется на этапе проектирования и базируется на научно обоснованном прогнозировании потребности в профилактических мероприятиях. Их долго-

срочное планирование (на год, сезон, квартал) осуществляют с использованием теории надежности, а краткосрочное – с учетом имеющихся методов и средств технической диагностики.

Профилактические работы включают такие мероприятия, как ежесменное, периодическое и сезонное техническое обслуживание. Наиболее ответственным видом профилактики является периодическое (или плановое) техническое обслуживание (ТО), которое предотвращает рост интенсивности потока отказов и различается объемом, составом и трудоемкостью работ.

Следует отметить значимость уровня организационных мероприятий и технической оснащенности работ по содержанию машин. Как правило, материальные потери вследствие низкого уровня организации таких работ зачастую превосходят затраты, связанные непосредственно с обеспечением надежности деталей, узлов и агрегатов машин.

Эффективность этих работ существенно возрастает, если техническое обслуживание проводят по результатам оценки технического состояния машины с использованием современных методов технического диагностирования. Диагностика, не оказывая влияния на техническое состояние машины и ее основных агрегатов, позволяет существенно снизить затраты на поддержание заданных показателей надежности и обеспечить более высокое качество технического обслуживания и ремонта. Использование современных диагностических средств (акустических, виброметрических и др.) снижает стоимость проверки основных агрегатов машин на 70–75 % по сравнению с их проверкой традиционными способами с частичной разборкой агрегатов. Кроме того, техническая диагностика способствует снижению аварийности машин, сокращению расхода топливо-смазочных материалов и рабочих жидкостей, повышению эффективности использования машин за счет уменьшения времени простоев при техническом обслуживании и ремонте.

Работы по восстановлению работоспособности машин при ремонте также 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.

Ремонт классифицируют по следующим признакам:

- 1) *по степени восстановления* – текущий и капитальный;
- 2) *по состоянию машины* – работающей или остановленной;
- 3) *по характеру* – ремонт с обновлением и без обновления;
- 4) *по планированию проведения* – плановый (предупредительный) и неплановый (аварийный, случайный, заявочный);
- 5) *по организации выполнения* – агрегатный, поточный, организацией-потребителем, предприятием-изготовителем.

Текущий ремонт (ТР) осуществляют в процессе эксплуатации для поддержания работоспособности машины с восстановлением или заменой отдельных деталей, узлов и агрегатов (кроме базовых), которые достигли предельного состояния. В связи с этим в его состав входят разборочно-сборочные, дефектационные и ремонтно-восстановительные работы. Последовательность этих работ, объем и характер ТР зависят от наличия в машинах однотипных силовых установок и агрегатов, блочно-модульных конструкций, а также унифицированных деталей и конструктивных элементов.

Капитальный ремонт (КР) производят для восстановления работоспособности машины и ее агрегатов с обеспечением обновленного ресурса 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 ТР. КР осуществляют в основном на специализированных ремонтных предприятиях; он предусматривает полную разборку машины или агрегата, дефектацию, восстановление или замену сборочных единиц, 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 6.2 представлены некоторые агрегаты привода ходового оборудования машины с базовыми и основными деталями.

Таблица 6.2 – 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

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 пере-

носятся 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 6.2 в общем виде представлены кинетические зависимости экономических показателей, включая расходы на ремонт, и потребительских характеристик машины [15]. При дальнейшей эксплуатации машины потребность в ремонтных мероприятиях только увеличивается с ростом затрат 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 следует учитывать два основных фактора: во-первых, экономическое обесценивание в процессе эксплуатации; во-вторых, увеличение расходов на поддержание работоспособного состояния машины. Эти соображения легли в основу оценки экономически оправданного срока службы машины, предложенные профессором Каракулевым А.В. и соавторами [15].

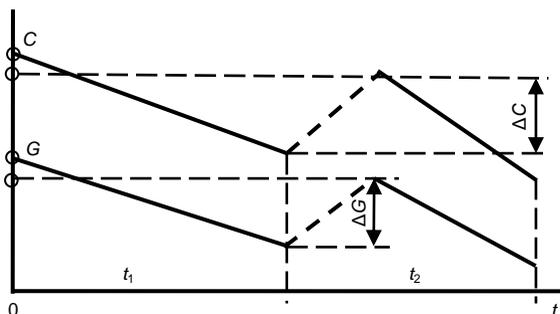


Рисунок 6.2 – Зависимость экономических показателей (C) и потребительских свойств (G) машины от времени наработки:
 t_1, t_2 – наработка до первого и второго ремонтов

Чем обусловлена стоимость машины на современном рынке? Как правило, повышенной надежностью узлов и агрегатов, низкими удельными показателями энерго- и металлоемкости, автоматизацией технологического процесса, высоким уровнем эргономики и экологической безопасности, что в совокупности обеспечивает высокое качество 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 машин равносильна ее восстановлению до первоначального состояния, тогда суммарные затраты на эксплуатацию машины

$$y = \left[\frac{1}{t} (C + \Delta C - d) \right] K (1 - i)^t, \quad (6.1)$$

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.;

d – ликвидационная цена старой машины (негодных деталей), руб.;

K – приращение (увеличение расхода ресурсов на поддержание машины в работоспособном состоянии (руб./год², руб./мото-ч² и др.);

t – срок службы машины в единицах времени (год, час) или работы (километры пробега, мото-часы, циклы, метры кубические и др.).

Анализ выражения (6.1) показывает, что первое слагаемое с ростом t уменьшается, а второе – растет (чем больше t , тем больше расходы K). Поэтому машину целесообразно эксплуатировать до тех пор, пока формула (6.1) не примет минимального значения, т. е.

$$\frac{dy}{dt} = K - \frac{C + \Delta C - d}{t^2} = 0.$$

Тогда экономически оправданный срок службы машины

$$t_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{C + \Delta C - d}{K}}. \quad (6.2)$$

Значения C определяют по прейскурантам цен на машину и ее перевозку потребителю, а стоимость ΔC (годных и подлежащих восстановлению деталей списываемой машины) – по формуле

$$\Delta C = (C_{\text{заг}}^{\text{н}} - C_{\text{заг}}^{\text{в}}) \beta + C_{\text{годн}},$$

где $C_{\text{заг}}^{\text{н}}$, $C_{\text{заг}}^{\text{в}}$ – 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 поддаю-

щихся 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.

Структура ремонта. Процесс ремонта машины значительно сложнее, чем процесс изготовления новой машины, поскольку при изготовлении исходной заготовкой является материал, а при ремонте – машина. Более того, ремонт является весьма сложной технологической системой, которая включает совокупность операций *анализа* (разборка машины на элементы) и *синтеза* (сборка машины из элементов).

Технологический процесс ремонта машины является частью производственного процесса. Он состоит из ряда операций и видов работ, которые по-разному связаны между собой. В зависимости от способа соединения структурных элементов (операций, видов работ) структура ремонта может быть трех видов: *последовательной, параллельной и комбинированной.*

Ремонт, структура которого образована *последовательным соединением элементов* (операции технологического процесса: контроль состояния машины, разборка на агрегаты и детали, мойка и очистка машины и ее частей и др. – выполняют одна за одной в определенной последовательности), применяют только в индивидуальном производстве. Его особенностями является довольно низкий уровень эффективности, большой простой машины в ремонте и ограниченные возможности применения высокооперационного оборудования.

Ремонт, структура которого образована *параллельным соединением элементов* (все технологические операции выполняются одновременно), применяют только в массовом производстве. Его особенности: число рабочих постов, число объектов ремонта должно соответствовать числу технологических операций; при этом длительность различных операций должна быть одинаковой. Следует отметить, что при ремонте дорожных и строительных машин практически невозможно использовать эту схему.

Комбинированная структура является наиболее предпочтительной именно при ремонте дорожных и строительных машин. Она совмещает параллельное и последовательное расположение элементов (рисунок 6.3). Здесь представлена структура ремонта, которая образована из обобщенных элементов (их можно разбить на более мелкие).

Например:

- 1 – подготовка к ремонту;
- 2 – разборка, мойка, очистка;

- 3 – контроль, комплектование, восстановление, изготовление деталей, сборка узлов;
- 4 – сборка машины из узлов и агрегатов;
- 5 – обкатка, испытания и контроль машины.

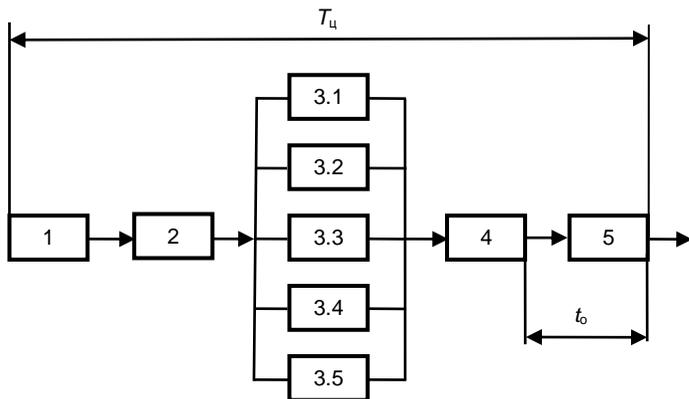


Рисунок 6.3 – Комбинированная структура соединения элементов:
 t_0 – время операции; $T_{ц}$ – время цикла

Структуру эту можно изменять, дробя элементы на более мелкие и меняя их расположение на оси времени. Это влияет на параметры процесса, к которым относятся цикл и такт.

Цикл – это интервал времени от начала первой до конца последней операции (независимо от числа одновременно ремонтируемых машин).

Такт – интервал времени, через который периодически производится выпуск отремонтированной машины определенного наименования.

Для системы с последовательным соединением элементов время цикла

$$T_{ц} = t_1 + t_2 + \dots + t_m = \sum_{i=1}^m t_i ,$$

где t_i – время технологической операции;

i – число операций.

Для комбинированной системы время цикла меньше:

$$T_{кц} = T_{ц} - \sum_{p=1}^{n-1} t_p ,$$

где $T_{кц}$ – время цикла при комбинированной системе;

t_p – время технологической операции, выполняемой параллельно с другими;

p – число параллельных операций.

Время цикла определяет эффективность использования оборудования и производственных площадей. Время можно уменьшить, изменяя структуру ремонта и деля ремонтные операции на более мелкие. При выборе процесса ремонта сопоставляют время цикла и коэффициент параллельности.

Эффективность комбинированной системы оценивают коэффициентом параллельности

$$K_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{кц}}}{T_{\text{ц}}}.$$

В этой системе основные элементы ремонта можно разделить на более мелкие элементы и (частично) пустить в параллельной системе.

В частности, элемент 1 – подготовка к ремонту – можно разделить на следующие подэлементы:

- 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.

Элемент 2 – разборка машины – также можно разбить на подэлементы:

- 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 др.

Эти элементы отличаются различной технологической общностью. Некоторые из них (приемка, мойка, очистка, сборка и разборка) выполняют при ремонте различных машин и агрегатов. Отдельные элементы (по восстановлению работоспособности агрегатов и узлов) являются специфическими и требуют специальных технологий и оборудования.

6.3 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 детали;
- 2) сортировка на три группы (годные для дальнейшего использования, подлежащие восстановлению, негодные);
- 3) сортировка деталей по маршрутам восстановления;
- 4) систематизация данных о результатах дефектации и сортировки, необходимых для совершенствования ремонтного производства.

Дефектом детали считают ее несоответствие требованиям нормативно-технической документации, что может быть причиной отказа детали, узла или машины в целом.

Сортируемые детали имеют следующие *типичные дефекты*:

- 1) износ, выражающийся в изменении размеров и формы поверхностей (появление 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 соосности, перпендикулярности, овальности, круглости, биениям и др.).

При дефектации руководствуются техническими требованиями на дефектацию машины (или агрегата). Они составляются в виде карт, где указано следующее:

- 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 детали 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. 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 (например, для вала) размер с учетом допускаемого износа, т. е. разность между номинальным размером детали и ее допускаемым износом. Соответственно, деталь выбраковывают, если ее размер (для вала) меньше остаточного ресурса.

Детали, подлежащие восстановлению, имеют дефекты (повреждения, износ), которые можно устранить технологическими способами с использованием соответствующего оборудования ремонтной службы предприятия.

Эти детали также маркируют соответствующим образом и направляют в производство или на склад заготовок ремонта.

Негодные детали имеют браковочные признаки, т. е. недопустимые дефекты, которые делают их непригодными для восстановления. Их дальнейшее использование – переработка.

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.

Способы выявления дефектов делятся на две группы: *визуальные* и *инструментальные (измерительные)*.

Часть дефектов можно обнаружить простым осмотром (визуально), при необходимости используя простейшие измерительные средства (масштабная линейка, 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.

Контроль состояния деталей выполняют в порядке усложнения дефектов и трудности их обнаружения:

- сначала визуально определяют наличие крупных трещин, деформаций, износа, изломов, коррозии, пробоин. Если обнаружены неустраняемые дефекты, деталь признается непригодной;

- далее пригодную (на первом этапе) деталь проверяют на наличие нарушения взаимного расположения рабочих поверхностей и существенно-го (недопустимого) изменения физико-механических свойств материала детали. Если обнаружен неустраняемый дефект, деталь выбраковывают;

- далее пригодную (уже на этом этапе) деталь контролируют на наличие скрытых дефектов;

- если эти дефекты не обнаружены, то приступают к определению износа и геометрических форм рабочих поверхностей детали.

Для выявления дефектов используют различные методы и средства, которые зависят от параметров и формы проявления дефектов, а также от конструктивных особенностей детали.

При наружном визуальном осмотре выбраковывают детали с недопустимыми дефектами, которые видны без технических средств (с полочками, трещинами, разрушениями швов, большими остаточными деформациями, износом, коррозионными поражениями и др.). Так, например, корпусные детали бракуют, если у них обнаружены сквозные трещины и изломы, сни-

жающие 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.

Визуальный наружный осмотр позволяет обнаружить достаточно крупные недопустимые дефекты. Для выявления более мелких дефектов (трещин, сколов, пробоин) применяют *визуально-оптический* контроль с помощью моно- и бинокулярных луп с 20–30-кратным увеличением. 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 испытывают сжатым воздухом, а затем погружают в воду, выявляя места дефектов по наличию пузырьков воздуха. 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 основан на свойствах жидкостей, обладающих наибольшим натяжением, проникать в невидимые поверхностные дефекты. Его суть состоит в том, что такая индикаторная жидкость, нанесенная на проверяемую поверхность детали, проникает в трещину и остается в ней. При нанесении на обработанную поверхность проявляющего вещества дефект обнаруживают визуально, по следу жидкости.

Процесс капиллярной дефектоскопии включает следующие стадии:

- 1) нанесение индикаторной жидкости на поверхность детали (крупногабаритной – кистью, малогабаритной – окунанием);
- 2) ополаскивание поверхности детали водой;
- 3) сушка поверхности;
- 4) обработка поверхности проявляющим веществом;
- 5) обнаружение дефекта по следу индикаторной жидкости, выступающей вдоль трещины.

Имеется несколько разновидностей капиллярного метода, позволяющих выявить поверхностные трещины, начиная с 0,01–0,02 мм по ширине. К ним относятся так называемые *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.

Люминесцентный метод дефектоскопии является разновидностью капиллярного. Он основан на способности некоторых веществ (*люминофоров*) светиться в ультрафиолетовых лучах. Как правило, он применяется 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.

Соответственно имеются два варианта люминесцентной дефектоскопии с применением *жидких и твердых* люминофоров.

Первый вариант включает следующие операции:

- 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 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 метода – комплекты типа ЛЮМ (ЛЮМ-А, ЛЮМ-Б, ЛЮМ-В), а также ДК-2 и ДК-5.

Метод магнитной порошковой дефектоскопии основан на намагничивании проверяемой детали и обнаружении искажений магнитного поля вблизи поверхностных дефектов (трещин, раковин, пустот). Метод применяют только для ферромагнитных материалов (сталей и чугунов). В качестве индикатора искажений магнитного поля используют тонкодисперсный магнитный порошок (с размером частиц 1–10 мкм) в сухом состоянии или в виде суспензии. Магнитные суспензии готовят на водной основе, а также на основе смеси минерального масла и керосина.

Намагничивание деталей производят следующими методами: *циркулярным (циркуляционным), полюсным и комбинированным.*

Намагничивание *циркуляционным* методом осуществляют пропусканием через деталь переменного или постоянного тока большой силы (до 10^3 А). Если же деталь полая (гильза, цилиндр и др.), то ток пропускают через стержень, устанавливаемый в полости детали.

Полюсовое намагничивание осуществляют полем постоянного магнита или электромагнита, в том числе соленоида. При этом деталь приобретает явно выраженные магнитные полюса. С помощью этого метода выявляют дефекты в шестернях, кольцах, пластинах, а также в валах и осях.

Комбинированный метод включает полюсное и циркулярное намагничивание. Его применяют для дефектоскопии сложных по конфигурации деталей.

Технологический 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.

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.

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 МГц), их отражения от дефектов и регистрации.

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) *метод просвечивания* (метод звуковой тени);
- 2) *импульсный метод* (эхометод).

Метод просвечивания основан на улавливании звуковой тени за дефектом. Проверяемую деталь размещают между излучателем ультразвуковых колебаний и приемником. В случае наличия дефекта колебания, посланные излучателем, отражаются от дефекта и не попадают на приемник. Перемещающая 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 применение метода.

Импульсный метод является более универсальным, поскольку приемник улавливает отраженные от дефекта ультразвуковые колебания, которые несут информацию о его границах. Излучатель и приемник, как правило, располагают на зонде (в виде плоского или призматического щупа), что значительно расширяет возможности анализа различных по конфигурации и габаритам деталей.

Достоинством ультразвуковых методов является весьма 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.

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 вал оказываются дефектными, %:

- гладкие поверхности – 50;
- шлицевые и гладкие поверхности со шпоночными канавками – 23;
- зубчатые поверхности – 5;
- резьбовые и прочие поверхности – 22.

Это позволяет в условиях серийного ремонтного производства разработать маршрутную технологию восстановления деталей машин. При этом состав операций определяют по сочетанию дефектов деталей.

6.4 Восстановление деталей.

Классификация основных методов

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 40 % трудоемкости ремонта машин.

Поэтому сокращение расходов – важная задача, одним из путей ее решения является восстановление дефектных деталей. К типичным дефектам деталей и сборочных единиц относятся следующие:

- 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 деталь или ее отдельные поверхности, как было отмечено, можно следующими методами:

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 некоторых процессов упрочнения деталей машин дает таблица 6.3 [9]. 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 6.3 – 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 цементуемых сталей
---	-----------	---------	--------	---

Продолжение таблицы 6.3

Способ	Технологические возможности			Назначение и эффективность процессов и способов
	HRC, HV	σ_0 , МПа	δ_y , мм	
<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
Алирование	–	–	0,5	Повышение долговечности деталей из сталей обычного качества, работающих при повышенной температуре, до уровня долговечности деталей из жаростойких сталей
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

Окончание таблицы 6.3

Способ	Технологические возможности			Назначение и эффективность процессов и способов
	HRC, HV	σ_0 , МПа	δ_y , мм	
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)
<i>Термомеханическая обработка</i>				
Высокотемпературная ТМО (ВТМО)	–	–	Все сечение	Упрочнение проката, поковок, штамповок, изделий, полученных волочением и выдавливанием (экструзией)
Низкотемпературная ТМО (НТМО)	–	–	Все сечение	Повышение пределов прочности легированных сталей в 5–6 раз (до 3100 МПа) при увеличении пластических свойств стали (относительное удлинение до 9–12 % относительное су-

				жение до 45 %)
Обозначения: HRC, HV – твердость поверхности; σ_0 – остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое; δ_y – толщина упрочненного слоя.				

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НАПЛАВКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ

Восстановление изношенных деталей – сложный процесс. В качестве заготовки используют изношенную, но уже сформированную деталь. Поэтому отсутствуют затраты на выполнение литья,ковки, штамповки и других операций. Но зато появляются дополнительные операции: мойка, разборка, дефектация, комплектация, затраты на которые следует учитывать.

Износ различных групп дорожно-строительных машин и автотракторного оборудования находится в широких пределах – от 0,01 до 10 мм. При этом установлено, что около 85 % деталей имеют износ до 0,6 мм.

Износ поверхностей деталей, %, 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 изделий 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, контактирующие с разрабатываемой средой.

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. В общем объеме сварочно-наплавочных работ электротермические методы составляют 80 %, газопламенные – 20 %.

Восстановление деталей сваркой и наплавкой 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 разд. 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 удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обеспечение неглубокого проплавления основного металла;
- 2) высокая технологичность процесса, малая чувствительность к состоянию поверхности и форме детали;
- 3) отсутствие склонности к возникновению дефектов (непроплавлений в местах стыков соседних швов, шлаковых образований, пор и трещин);
- 4) высокая 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 электросопротивления);
- 3) использование присадочных материалов;
- 4) поперечные колебания электрода.

Достоинства сварки и наплавки:

- 1) недефицитность и дешевизна материалов;
- 2) простота, компактность и транспортабельность оборудования;
- 3) высокая прочность сцепления основы с наплавляемым слоем.

Недостатки наплавки:

- 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.

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 2 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 $T = 3100 \dots 3300$ °С, у остальных газов температура горения ниже на 500–800 °С);

2) *по виду напыляемого 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);

Таблица 7.1 – Характеристика и области применения различных видов газового пламени

Вид пламени	Отношение O_2/C_2H_2	Температура пламени, °С	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

4) по способу транспортирования порошка в зону пламени наплавку разделяют на два способа:

- а) с подводом порошка в центральный канал горелки;
- б) с подводом порошка в зону пламени 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.

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 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.

Техпроцесс состоит из следующих стадий:

- 1) предварительный нагрев детали (с помощью горелки) до температуры

$$T_{п.н} = \begin{cases} 250...300 \text{ }^{\circ}\text{C} & \text{– с оплавлением материала покрытия;} \\ 50...100 \text{ }^{\circ}\text{C} & \text{– без оплавления} \end{cases}$$

- 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 детали;
- 5) охлаждение детали с низкой скоростью во избежание образования трещин.

В комплект оборудования входят следующие элементы:

- 1) горелка (с дозатором материала);
- 2) компрессор;
- 3) баллоны с газами;
- 4) коммуникации.

Для порошков с внутренней подачей порошка разработаны и используются несколько типов установок: УПН-8, УПН-68 и УГПТ (Барнаульского аппаратно-механического завода), УПТР-83, УПТР-86 (Белорусского научно-производственного комплекса порошковой металлургии) и др.

Для проволочных и прутковых материалов разработаны специальные установки типа МГИ-1-57, МГИ-3, МГИ-4, МГИ-5.

Нанесение порошкового сплава на деталь производят с помощью специальной газопламенной горелки (рисунок 7.1).

Достоинства:

- 1) восстановление мелких деталей сложной формы;
- 2) снижение опасности трещинообразования за счет предварительного подогрева детали;
- 3) простота и доступность.

Недостатки:

- 1) большие тепловые потери при обработке массивных деталей;
- 2) расход дефицитного газа.

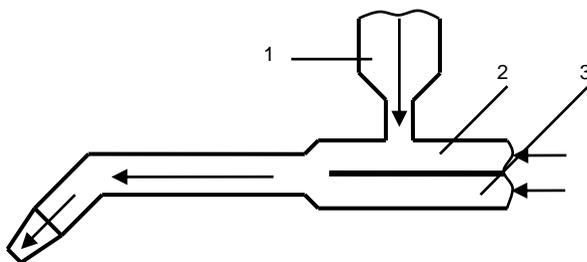


Рисунок 7.1 – Схема горелки для газопорошковой наплавки:

1 – бункер с порошком; 2 – канал для подачи кислорода; 3 – канал для подачи горючего газа

В зависимости от марки материала можно повысить прочностные характеристики, в том числе твердость до значений 50–60 HRC и 300–350 HB.

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. К их числу относятся ручная наплавка покрытыми электродами, механизированная наплавка под флюсом и в среде защитных газов, электрошлаковая, вибродуговая и плазменная наплавки.

Толщину наплавленного слоя устанавливают в зависимости от условий работы детали и глубины износа ее поверхности. Как правило, для деталей, работающих на износ, толщина слоя не должна превышать 2–4 мм.

Дуговая наплавка покрытыми электродами. Покрытые электроды имеют стержень (проволоку диаметром 2–8 мм из низкоуглеродистой стали) и оболочку (покрытие). Она содержит шлакообразующие компоненты защиты, легирующие и другие наполнители (раскислители, а также вещества, стабилизирующие горение дуги). В СНГ имеется несколько стандартов на электроды, которые включают более 50 типов электродов с основным покрытием.

В качестве примера можно привести один из распространенных составов покрытия:

- шлакообразующий компонент (плавиковый шпат CaF_2);
- раскислитель (сплав Fe с Mn, Si, Ti, Al);
- связующее (жидкое стекло);
- легирующий компонент.

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 (сормайт, стеллит). Следует отметить использование наклонных и лежащих электродов. В последнем случае используют 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.

Недостатки:

- 1) низкая производительность (0,5–3,0 кг/ч);
- 2) нестабильность качества (состава) наплавленного металла.

По данным ВНИИЖТа, восстановительная наплавка в путевом хозяйстве в основном производится ручными способами.

Дуговая наплавка под флюсом (механизированная или автоматизированная). Дуга скрыта под слоем сухого гранулированного флюса (толщиной 20–40 мм). Одновременно плавятся сварочный материал, основной металл и флюс. В качестве электродов используют:

- проволоки сплошного сечения (из углеродистых, легированных и высоколегированных сталей);
- порошковые проволоки (из легированных и высоколегированных сталей);
- ленты (сплошные спеченные, металлокерамические).

Для механизированной наплавки используют различные схемы: один электрод, многоэлектродную систему и электродную ленту.

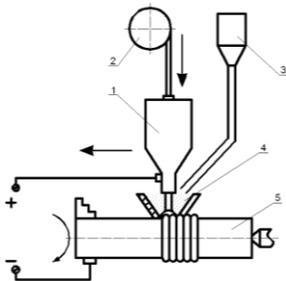


Рисунок 7.2 – Схема установки для автоматической наплавки под слоем флюса: 1 – наплавочный аппарат; 2 – кассета; 3 – бункер; 4 – приемник; 5 – деталь

На рисунке 7.2 представлена принципиальная схема установки для автоматизированной наплавки под слоем флюса. Для этих целей используют, как правило, модернизированные токарные станки, оснащенные наплавочными головками различными конструкциями (в зависимости от вида наплавочного материала, габаритов детали и др.). Деталь фиксируется в патроне или центрах, а наплавочный аппарат – на суппорте станка.

Достоинства:

- 1) увеличенная производительность 2–15 и 5–30 кг/ч в зависимости от схемы наплавки;
- 2) наплавка слоя с заданными составом и свойствами (качество не зависит от квалификации сварщика);
- 3) возможность получения слоя толщиной 1–10 мм.

Недостатки:

- 1) ручное удаление шлаковой корки;
- 2) ограничения по размерам ($\varnothing \geq 50$ мм) из-за высокой температуры разогрева металла;
- 3) коробление изделия из-за большого прогрева.

В качестве флюсов используют керамические, плавные материалы и смеси. Применение керамических флюсов с легирующими элементами (графитом, Fe–Mn, Fe–Si, Fe–Cr, Al) перспективно для быстро изнашивающихся деталей машин (опорных катков, направляющих колес, осей, рабочих органов).

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 газовой среды используют CO_2 , а также инертные газы (Ar, He и др.), с целью стабилизации дуги применяют смесь (80 % Ar + 20 % CO_2 или O_2).

В качестве электродов используют *сплошную цельнометаллическую и порошковую проволоку*. Проволока сплошного сечения имеет диаметр от 0,8 до 2,5 мм. В ее состав входят раскислители (Mn, Si) и легирующие добавки (Ni, Cr, Mo, Va). По стандартам СНГ имеются углеродистая, легированная и высоколегированная проволоки, а также проволока из бронзы (Al-Fe, Al-Mn, Si-Mn). *Порошковую проволоку* выпускают легированную и высоколегированную для обеспечения износостойкого и коррозионностойкого слоя. Она состоит из мягкой тонколистовой металлической оболочки и сердцевинки из смеси порошков (сплавов, чистых металлов, карбидов, боридов, раскислителей, шлакообразующих и стабилизаторов).

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 небольшой глубине зоны термического влияния на основной металл.

Принципиальная схема дуговой наплавки в среде CO_2 представлена на рисунке 7.3. 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.

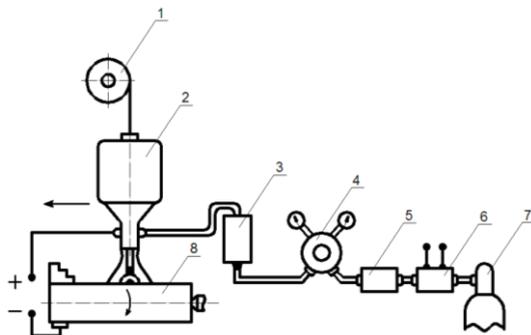


Рисунок 7.3 – Схема установки для дуговой наплавки в углекислом газе:

1 – катушка с проволокой; 2 – наплавочная головка; 3 – расходомер; 4 – редуктор; 5 – влагопоглотитель; 6 – подогреватель газа; 7 – баллон с углекислым газом; 8 – деталь

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.

Для них разработаны автоматы и полуавтоматы. В качестве 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.

Достоинства:

1) наплавка на тонкостенные и нежесткие изделия (без деформации и коробления), а также на детали малого диаметра ($10 < \text{Ø} < 50$ мм);

2) высокая производительность (1,5–8,0 кг/ч);

3) отсутствие трудоемкой операции по удалению шлаковой корки.

Недостатки:

1) сравнительно низкая твердость и износостойкость наплавочного слоя, поскольку нет легирования через флюс;

2) в случае CO_2 его окисляющее действие требует применения (в проволоке) легирующих добавок Si и Mn.

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 7.4 представлена принципиальная схема электрошлаковой наплавки опорного катка (обода детали).

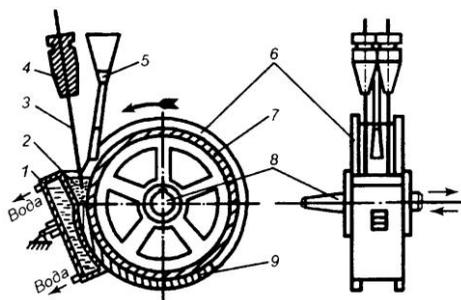


Рисунок 7.4 – Схема электрошлаковой наплавки:

1 – кристаллизатор; 2 – шлаковая ванна; 3 – электрод; 4 – мундштук; 5 – дозатор легирующих добавок; 6 – диски; 7 – наплавляемая деталь; 8 – оправка; 9 – наплавленный слой металла

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.

Достоинства:

- 1) самая высокая производительность – до 150 кг/ч;
- 2) низкий расход флюса;
- 3) отсутствие разбрызгивания шлака и присадочного материала.

Недостатки:

- 1) ограниченные технологические возможности по конфигурации и габаритам детали;
- 2) сложность оборудования;
- 3) необходимость термообработки после наплавки из-за снижения в оклошовной 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 7.5), которую устанавливают (вместо резцедержателя) на суппорте токарного станка. Она подает проволоку в зону наплавки и осуществляет ее вибрирование.

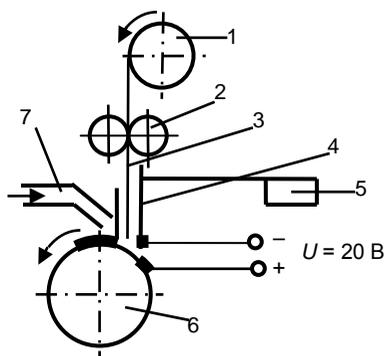


Рисунок 7.5 – Схема вибродуговой наплавки:

- 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

С помощью охлаждающей жидкости (3–5 % водного раствора соды или 10–20 % водного раствора технического глицерина) производятся:

- 1) закалка наплавленного слоя без дополнительной термической обработки;
- 2) защита расплава металла от O_2 и N воздуха;
- 3) предотвращение перегрева детали.

С помощью вибродуговой наплавки наращивают детали из углеродистой и малолегированной стали практически любой толщины (до 3 мм за один проход).

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 наплавленного металла.

Достоинства:

- 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 оборудования, типом присадочного материала, способом его подачи на изношенную поверхность и электрической схемой подключения. Вместе с тем, основным элементом технологического оборудования является плазматрон.

Плазматрон – это устройство для генерирования низкотемпературной плазмы ($T < 100000$ °С) путем продувания плазмообразующего газа через электрический дуговой разряд. Затем в зону электрической дуги подают наплавочный (или присадочный) материал в виде порошка, проволоки и их комбинаций (в том числе двух проволок). Любой плазматрон имеет два основных элемента: электрод (катод) и сопло. Разработано большое количество плазматронов, которые классифицируют по следующим признакам:

- 1) по способу охлаждения электрода и сопла – плазматроны с воздушным и водяным охлаждением;
- 2) по типу дуги – плазматроны с дугой прямого, косвенного и комбинированного действия.

Дуга прямого действия (рисунок 7.6, 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 7.6, 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.

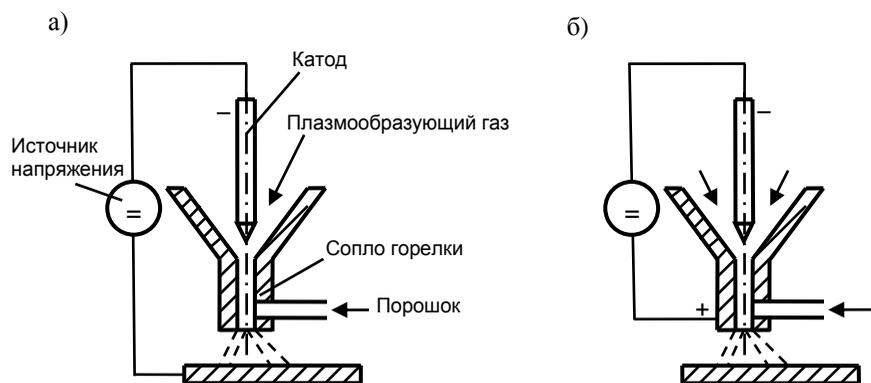


Рисунок 7.6 – Типы плазменной наплавки:
а – дуга прямого действия; б – дуга косвенного действия

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*;

3) *по типу плазмообразующей среды* – плазмотроны с инертной (Ar, He), восстановительной (H₂, N₂, NH₃) и окислительной (O₂, CO₂, H₂O и др.) средой;

4) *по типу катодов* – плазмотроны с расходуемым, газозащищенным и пленкозащитным электродом. Самым распространенным является газозащищенный вольфрамовый электрод.

В комплект оборудования входят следующие узлы: плазмотрон, механизм транспортирования порошковых или проволочных материалов, механизм перемещения детали (или плазмотрона), механизм колебания плазменной горелки, пульт управления (с измерительными, регулировочными и блокировочными устройствами), источник питания дуги, источник и приемник охлаждающей воды, коммуникации, обеспечивающие подвод газа, электроэнергии и воды.

Большинство плазмотронов работает на постоянном токе (но есть на переменном и импульсном). 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.;

– для наплавки – типа УПН-303, УПН-302, УПН-602;

– для напыления – типа УПМ-5, УПМ-6, УПУ-3, УПУ-5.

Процесс наплавки выглядит следующим образом (рисунок 7.7). Между катодом (W) и медным водоохлаждаемым соплом, которое является анодом, возникает дуга. Она возбуждается поэтапно, что связано с достаточно большим расстоянием между катодом и обрабатываемой деталью. 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 плазменной высокотемпературной струи. Наплавочный (присадочный) материал в виде двух проволок подают в сопло с помощью механизма протяжки. Он (присадочный материал) попадает в зону плазмы, нагревается, расплавляется и переносится на деталь. Часто используют поперечные колебания плазменной горелки, что дает возможность получить широкий валик наплавочного слоя (до 60–70 мм).

Преимущества:

1) высокая производительность;

2) малая зона термовлияния и низкая деформация обрабатываемых деталей;

3) восстановление и упрочнение деталей нежестких конструкций;

4) наплавка тугоплавких металлов;

5) малая толщина переходного слоя комбинированного химического состава между деталью и наплавленным покрытием.

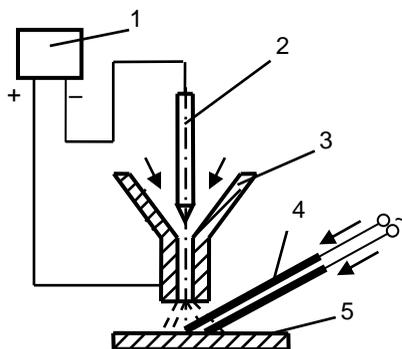


Рисунок 7.7 – Схема плазменной наплавки:

1 – источник постоянного тока; 2 – катод; 3 – плазменная горелка; 4 – две проволоки (для их подогрева используют переменный ток); 5 – наплавляемая деталь

Недостатки:

- 1) низкая прочность сцепления (в ряде случаев) наплавляемого слоя с основным металлом;
- 2) высокая стоимость работ.

Плазменная наплавка порошковых материалов (плазменно-порошковая наплавка) находит широкое применение для восстановления разнообразных деталей и узлов подвижного состава, путевых и дорожно-строительных машин. По сравнению с ручной наплавкой она на 30–50 % повышает производительность, на 50–70 % сокращает расход наплавочных материалов и на 50 % снижает потребление электроэнергии. В качестве примера можно привести 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), его низкое содержание в наплавленном слое (до 5 %) позволяют сохранить практически без изменения исходные свойства наплавляемого материала.

В зависимости от требований, предъявляемых к поверхности восстанавливаемых деталей, наплавка может производиться порошковыми высоколегированными сплавами на основе железа, самофлюсующимися сплавами или порошками на основе хрома, бора, никеля и меди.

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 получила широкое распространение при восстановлении узлов трения подвижного состава (корпуса автосцепок, упорные плиты, тяговые хомуты, тарели 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 бетононосмесителей, лопастей смесительных установок, долот бурильной техники и др.). Для их восстановления используют твердые порошковые сплавы на железной основе, которые позволяют в 2–3,5 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 7.2 представлены показатели производительности различных методов наплавки.

Таблица 7.2 – Ориентировочная производительность различных методов наплавки

Способ наплавки	Производительность, кг/ч
Ручная наплавка покрытыми электродами	0,5–3,0
Механизированная наплавка под флюсом:	
одним электродом	2–15
многоэлектродная	5–30
электродной лентой	5–30
Механизированная наплавка в углекислом газе	1,5–8,0
Механизированная наплавка самозащитной порошковой проволокой:	
одним электродом	2–10
двумя электродами	5–20
Механизированная наплавка порошковой лентой	10–20
Вибродуговая наплавка	До 30
Электрошлаковая	До 150
Плазменная наплавка	5–15
Заливка жидким металлом	10
Наплавка погружением в расплав	35
Индукционная наплавка	До 20

Последующая обработка наплавленных деталей. При наплавлении деталей из среднеуглеродистых 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).

Для релаксации остаточных напряжений используют отпуск ($T = 600 \dots 750$ °С 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.

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Напыление (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 микрометров 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). Методы нанесения покрытий можно классифицировать по нескольким основным признакам:

1) *по назначению* – триботехнические (антифрикционные и фрикционные), антикоррозионные (коррозионностойкие), защитно-декоративные, а также специального назначения (жаростойкие, антиадгезионные, антизадириные, адгезионноспособные и др.);

2) *по природе материала* – металлические и неметаллические (керамические);

3) *по исходному агрегатному состоянию* материала – покрытия, формируемые:

а) из газовой фазы;

б) жидкой фазы (расплав, раствор, паста, суспензия);

в) твердой фазы (пленки, листы, отдельные частицы);

4) *по методу переноса материала* на поверхность детали:

а) с помощью транспортирующего газа;

б) с помощью электрического поля;

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 наиболее перспективным методом, 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 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).

Как уже отмечалось, реализовать эти требования можно нанесением на деталь покрытий с нужными свойствами. Их толщина фактически регламентируется величиной допускаемого износа деталей в узлах трения машин, который 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) соответствие (совместимость) коэффициентов (линейного) термического расширения материалов покрытия и основы;
- 6) ремонтпригодность покрытий.

Для покрытий триботехнического назначения (эксплуатирующихся в узлах трения) к специальным требованиям относятся:

- 1) низкий коэффициент трения;
- 2) высокая твердость;
- 3) высокая износостойкость;
- 4) хорошая прирабатываемость;
- 5) оптимальная микрогеометрия поверхности покрытия.

В общем случае технологический процесс включает следующие основные операции:

- 1) подготовку обрабатываемой поверхности детали (включая локальную защиту поверхностей от покрытия);
- 2) нанесение покрытия на поверхность детали;
- 3) термообработку полученной системы деталь – покрытие;
- 4) механическую обработку покрытия.

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) материалов;

2) возможность напыления различных материалов с помощью одного и того же оборудования;

3) отсутствие ограничений по размеру обрабатываемых изделий по сравнению с электролитическим осаждением, погружением в расплав или диффузионным насыщением (азотированием, цементацией и др.);

4) возможность нанесения покрытий толщиной в несколько миллиметров за достаточно короткий промежуток времени;

5) небольшая деформация изделий 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;

4) затруднения в последующей механической обработке тонкослойных покрытий.

Напыление осуществляют основными группами материалов: металлами, сплавами и композиционными материалами на их основе; керамическими материалами.

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 другом напылении.

Проволока дает возможность непрерывной и равномерной 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 покрытия нарушается из-за различной степени проплавления и скорости движения в струе крупных и мелких частиц. Для напыления обычно используют порошки, 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).

При напылении 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 используют покрытия из материалов, обеспечивающих улучшение триботехнических свойств. В частности, молибден и вольфрам применяют для повышения износостойкости и ударной прочности; кобальт – для повышения износостойкости при высоких и нормальных температурах; никель – для защиты от эрозии и коррозии; стали (углеродистые и легированные) – для повышения абразивной износостойкости; медь (в составе бронз) – для повышения коррозионной стойкости, износостойкости и стойкости к схватыванию при больших нагрузках; алюминий – для повышения жаростойкости.

Отличие напыления от наплавки заключается в том, что при напылении практически отсутствует оплавление поверхности основного металла. Как следствие, не меняются его структура и свойства, но прочность сцепления наплавленного слоя с основой (адгезионная прочность) имеет довольно низкие значения (не более 50–60 МПа). Это существенно ограничивает области применения покрытий в узлах трения, в основном их используют для восстановления деталей в условиях усталостного изнашивания, а также при отсутствии ударных нагрузок. Напыление целесообразно использовать для восстановления:

- 1) деталей из чугуна и алюминия, трудно поддающихся восстановлению другими способами;
- 2) деталей (из любых сплавов), для которых не допускается их деформация;
- 3) деталей, не подверженных значительным динамическим нагрузкам.

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 осуществляют нанесением металла, который в исходном состоянии представляет собой порошок, проволоку или прутки, с помощью установок, производящих наплавку.

Газопламенное напыление производят, как правило, восстановительным пламенем, что позволяет (по сравнению с электродуговой металлизацией) уменьшить выгорание легирующих элементов и обезуглероживание материала и тем самым повысить 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 материалов, с помощью которого восстанавливают изношенные посадочные поверхности валов и корпусных деталей.

В отличие от газопламенной наплавки напыление осуществляют *без последующего оплавления покрытий*. Как уже отмечалось, напыление можно использовать для восстановления деталей, не подвергающихся ударному воздействию и знакопеременным нагрузкам с износом до 2 мм.

Технологический процесс восстановления деталей с газопламенным напылением состоит из следующих операций:

- 1) предварительный нагрев детали до температуры 200–250 °С;
- 2) нанесение подслоя;
- 3) нанесение основного слоя покрытия за несколько проходов (при общей толщине покрытия не более 2 мм);
- 4) механическая обработка;
- 5) контроль качества покрытия.

Достоинства газопламенного напыления обусловлены следующими технологическими особенностями процесса получения покрытий:

- 1) малое тепловое воздействие на материал детали, что позволяет наносить покрытия на легковоспламеняющиеся материалы (картон, древесину, пластмассы и др.);
- 2) обеспечение толщины покрытий от 50 мкм до нескольких миллиметров;
- 3) возможность регулирования газового режима горелки за счет управления химическим составом газовой среды;
- 4) высокий коэффициент использования материала (0,60–0,95);
- 5) возможность нанесения покрытий на детали без ограничения их размеров и конфигурации при наличии необходимых средств механизации;
- 6) легкость и простота обслуживания оборудования;
- 7) мобильность оборудования, позволяющая осуществлять нанесение покрытий в полевых условиях;

8) возможность 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 МПа) прочность сцепления покрытия с основой;
- 2) довольно большая пористость (5–25 %);
- 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.

За рубежом активно развиваются высокоскоростные методы напыления. Благодаря сверхзвуковой скорости (~ 1800 м/с) подачи горючего газа скорость порошковых частиц достигает 300–500 м/с, что обеспечивает высокое качество покрытий. Например, покрытия из WC и Co имеют пористость всего 0,5 %, адгезионную прочность соединения со сталью – до 120 МПа при твердости 1100–1300 HV.

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 металллизации;
- 2) столб дуги имеет большое межэлектродное расстояние. Этот вид используют в плазменном напылении.

Дуговая металллизация. Сущность дуговой металллизации (рисунок 8.1) состоит в том, что в зону дуги непрерывно подают две изолированные, находящиеся под 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 осаждается на поверхности детали. Для дуговой металллизации 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.

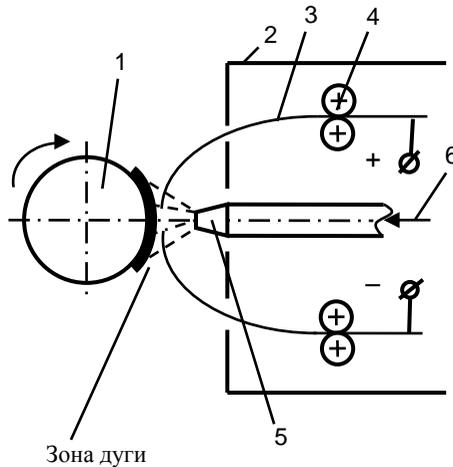


Рисунок 8.1 – Схема дуговой металлизации:

1 – деталь; 2 – кожух; 3 – проволоки; 4 – подающий механизм; 5 – сопло; 6 – сжатый газ

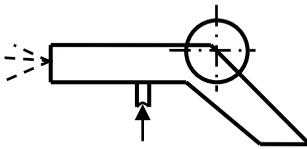


Рисунок 8.2 – Схема ручного дугового металлизатора

Ручной дуговой металлизатор (рисунок 8.2) выполнен в виде пистолета. В алюминиевом корпусе смонтирован роликовый проволокопротягивающий механизм, который приводится в действие электродвигателем или воздушной турбинкой.

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.

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:

- 1) наносят подслоу, защищающий основной металл от окисления;
- 2) наносят покрытие из требуемого сплава.

Достоинства дуговой металлизации:

- 1) 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 ($T_{\text{дег}} < 100 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Недостатки:

- 1) перегрев и окисление напыляемого металла;

2) выгорание части легирующих добавок, что необходимо компенсировать их увеличенным содержанием в исходном материале.

Плазменное напыление, как и плазменная наплавка, осуществляется с помощью плазмотрона (рисунок 8.3).

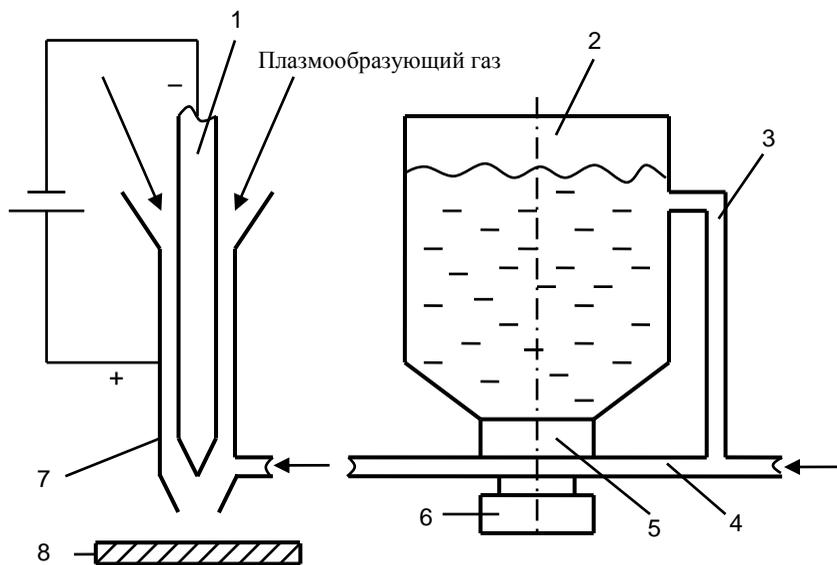


Рисунок 8.3 – Принципиальная схема плазменного напыления порошковыми материалами:

- 1 – катод; 2 – бак с порошком; 3 – трубка уровня давления;
- 4 – трубка ввода транспортирующего газа; 5 – дозирующее устройство;
- 6 – вибратор; 7 – сопло; 8 – деталь

Для плазменного напыления 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 используются автоматизированные и полуавтоматизированные плазменные установки, которые выпускают известные фирмы-производители США, Швейцарии, Германии и других стран.

Технология плазменного напыления включает те же стадии, что и плазменная наплавка, которая подробно рассмотрена ранее в разделе 7.2.

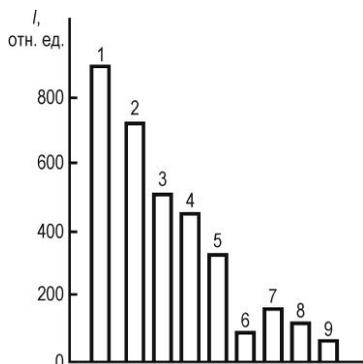


Рисунок 8.4 – Износ различных покрытий при сравнительных испытаниях в условиях сухого трения: 1 – низкоуглеродистая сталь; 2 – молибденосодержащая сталь; 3 – хромомолибденовая сталь; 4–6 – стеллиты; 7–9 – колмонон

Значительные преимущества плазменных покрытий подтверждают данные рисунка 8.5, 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.

Помимо уже ставших традиционными областей применения плазменных покрытий для восстановления деталей двигателей внутреннего сгорания, в том числе поршневых колец, впускных и выпускных клапанов, опор коренных подшипников, поверхностей гильз цилиндров и др., ведутся работы по использованию плазменных покрытий для восстановления деталей, эксплуатирующихся в условиях ударно-абразивного воздействия. Имеются сведения о положительном опыте при-

Плазменное напыление позволяет решить задачу восстановления и повышения износостойкости деталей машин с помощью тонкослойных покрытий специфической структуры и пористости (5–15 %) в условиях трения скольжения. Широкий спектр материалов для покрытий позволяет подобрать нужный состав с учетом режимов эксплуатации узла трения машины. Как правило, износостойкость плазменных покрытий повышается с увеличением твердости материала, о чем свидетельствуют данные рисунка 8.4. Износостойкость покрытий также повышается при образовании оксидных пленок, а также при введении в материал твердых компонентов в виде карбидов, боридов и феррооксидов.

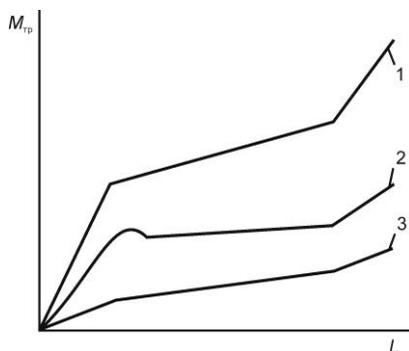


Рисунок 8.5 – Зависимость момента сил трения от пути трения для различных материалов: 1 – сталь 45 (со смазкой); 2 – сталь 3 с плазменным покрытием (без смазки); 3 – сталь 3 с плазменным покрытием (со смазкой)

менения плазменных покрытий рабочих органов дорожно-строительных машин, в том числе зубьев ковшей экскаваторов, ножей отвалов автогрейдеров и бульдозеров. Нанесение методом воздушно-плазменного напыления покрытий из твердых сплавов увеличивает срок службы рабочих органов машин в 2–3 раза.

Перспективы развития *плазменного напыления* и повышения качества покрытий состоят в следующем:

1) комплексная автоматизация технологического процесса путем создания блочно-модульных систем, управляемых микропроцессорами и компьютерами;

2) совершенствование плазмотронов путем повышения их удельных показателей мощности;

3) совершенствование методов нанесения покрытий за счет использования сверхзвуковых плазмотронов;

4) расширение номенклатуры напыляемых материалов, создание комбинированных многослойных покрытий, обеспечивающих комплекс заданных эксплуатационных свойств.

В таблице 8.1 сопоставлены технико-экономические показатели различных методов получения защитных износостойких слоев металла на деталях.

В целом *процесс напыления* совершенствуется в нескольких направлениях. Во-первых, разработка новых материалов для создания многофункциональных покрытий; во-вторых, совершенствование технологического оборудования; в-третьих, 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 систем IPM (Intelligent Processing of Materials), которые обеспечивают выбор наиболее эффективных путей управления свойствами покрытий с учетом взаимосвязи параметров технологического процесса и характеристик напыляемых материалов, а также формы и габаритов обрабатываемых деталей.

8.3 Нанесение электролитических покрытий

Электролитическое (гальваническое) нанесение покрытий (хромирование, осталивание, никелирование, меднение) применяют для восстановления изношенных поверхностей деталей, а также для получения защитно-декоративных покрытий.

В основе нанесения гальванических покрытий лежит процесс электролиза (рисунок 8.6), который протекает между двумя электродами при прохождении постоянного тока через электролит. В качестве электролита используют раствор солей металла, который необходимо осадить в виде покрытия на восстанавливаемой детали. Под действием постоянного тока молекулы раствора электролита разделяются на катионы (положительно заряженные ионы), которые перемещаются к катоду, и анионы (отрицательно заряженные ионы), которые перемещаются к аноду. В результате на катоде формируется покрытие из атомов наносимого металла.

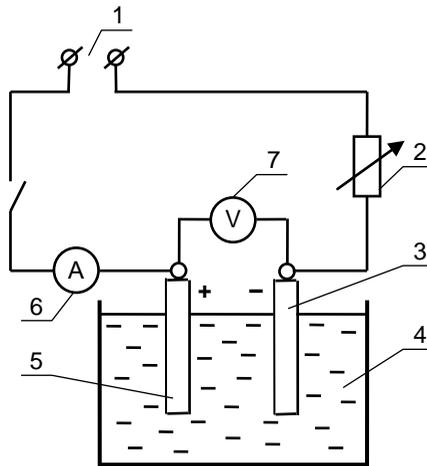


Рисунок 8.6 – Схема электролитического нанесения покрытий:
1 – источник питания; 2 – регулируемое сопротивление; 3 – катод (деталь);
4 – ванна с электролитом; 5 – анод; 6 – амперметр; 7 – вольтметр

Электролитический метод используют как для получения основного покрытия, так и для создания подслоя с последующим нанесением основного слоя полимерного или металлического покрытия.

Количественно процесс электролиза определяется законами Фарадея, с помощью которых производят расчет толщины покрытий (или времени нанесения) в зависимости от основных характеристик процесса.

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.). Для получения качественных покрытий площадь поверхности анода должна в 2–3 раза превышать площадь поверхности катода. 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.

Для крупногабаритных деталей используют несколько анодов для формирования равнотолщинных покрытий. Кроме того для деталей сложной конфигурации применяют фасонные аноды, соответствующие их форме.

При ремонте чаще всего используют *хромирование* и *осталивание*.

Хромирование является сложным многостадийным процессом. Он включает подготовку поверхности, хромирование и обработку детали после хромирования.

Подготовка поверхности детали включает следующие операции:

- 1) шлифование и полирование;
- 2) обезжиривание;
- 3) обработку в щелочной ванне (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) анодное декапирование для уничтожения пленок окислов: непосредственно в ванне перед хромированием меняют полярность электродов, т. е. деталь используют в качестве анода.

Хромирование осуществляют на детали – катоде. Оно состоит из следующих операций:

- 1) собственно хромирование;
- 2) промывка детали водой и ее сушка;
- 3) предварительный технический контроль.

Хромирование производят в ваннах с электролитом, включающим раствор хромового ангидрида CrO₃ и серной кислоты H₂SO₄ в воде (анод – свинцовая пластина; $U = 6 \dots 8$ В, $I \leq 50$ А/дм², материал ванны – свинец или пластмасса).

В зависимости от режимов (рисунок 8.7) (плотности катодного тока I_k и температуры ванны) получают три вида покрытия:

- а) молочные – обладают высокой износостойкостью, но малой H_B ;
- б) блестящие – хрупкие, но кислотоупорные;
- в) матовые (серые) – обладают большой H_B , но малой износостойкостью.

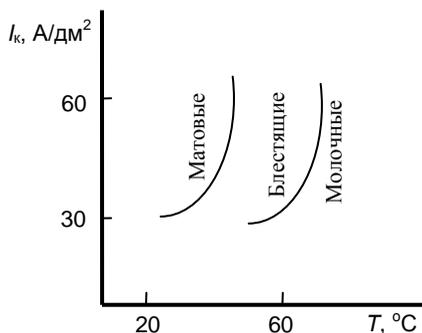


Рисунок 8.7 – Зависимость типа покрытия от режимов нанесения

В таблице 8.2 представлены соотношения компонентов электролита, влияющие на эксплуатационные характеристики покрытий.

Таблица 8.2 – Тип покрытия в зависимости от соотношения компонентов в электролите

Тип покрытия	$\text{CrO}_3, \text{г/л}$	$\text{H}_2\text{SO}_4, \text{г/л}$
Износостойкое	150	1,5
Защитно-декоративное	300–400	3,0–4,0
Универсальное	200–250	2,0–2,5

Блестящие и матовые покрытия используют 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.

Обработка детали после хромирования состоит из следующих операций:

- 1) шлифование и полирование;
- 2) обработка струей керосина (0,5–0,6 МПа) в случае пористого покрытия;
- 3) окончательный технологический контроль.

Так как хромовая ванна имеет малую рассеивающую способность, то большое значение при хромировании имеет правильное изготовление и расположение анодов и экранов. Они должны обеспечивать равномерную плотность тока по всей хромируемой поверхности. Припуск на обработку при хромировании обычно составляет 0,05–0,1 мм.

Для повышения износостойкости стальных деталей наносят покрытия из хрома толщиной до 0,1–0,2 мм. Электролитический хром обладает высокой коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения, высокой твердостью (1000–1100 НВ) и жаростойкостью. Износостойкость хромированных деталей по сравнению с необработанными возрастает в 5–15 раз. При тщательной подготовке поверхности прочность сцепления хрома со сталью, чугуном и никелем (при испытании на сдвиг) достигает 300 МПа.

Для ванн время хромирования можно определить с учетом выбранной плотности катодного тока I_k по формуле

$$t = 10 \frac{hc}{C I_k^3},$$

где h – заданная толщина слоя, мм;

ρ – плотность металла, г/см³;

C – электрохимический эквивалент, г/А·ч,

$$C = \begin{cases} 0,324 - \text{Cr}; \\ 1,042 - \text{Fe}; \\ 1,095 - \text{Ni}; \end{cases}$$

η – КПД ванны,

$$\eta = \begin{cases} 0,12 - \text{Cr}; \\ 0,80 - 0,95 - \text{Fe}; \\ 0,95 - 0,98 - \text{Cu}; \\ 0,90 - 0,95 - \text{Ni}. \end{cases}$$

Достоинства хромированных покрытий:

- 1) высокие твердость, износостойкость и коррозионная стойкость;
- 2) сохранение структуры и свойств основного металла;
- 3) высокая адгезионная прочность.

Недостатки:

- 1) небольшая (до 0,35 мм) толщина покрытий с высокими показателями свойств;
- 2) низкая (15–30 мкм/ч) скорость и производительность процесса;
- 3) необходимость больших площадей;
- 4) значительное (на 15–25 %) снижение усталостной прочности восстановленных деталей.

Для хромирования крупногабаритных деталей 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.

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 механизмов (шеек валов и зубчатых колес, соединительных пальцев, валиков, шеек осей, реек, червяков) она составляет 100–200 мкм; деталей пресовых и других неразъемных соединений, гнезд шарикоподшипников – до 400 мкм; цилиндров двигателей внутреннего сгорания – 20–50 мкм.

Совершенствование процесса хромирования осуществляется в основном для повышения производительности процесса. Во-первых, применяют *саморегулирующиеся электролиты*, в которых автоматически поддерживается оптимальное соотношение между их компонентами. Это достигается за счет введения в электролит солей (сернистого стронция и кремнефтористого калия) в количестве, превышающем их растворимость. В результате избыток этих солей присутствует в электролите в виде осадка, растворением или увеличением которого достигается стабилизация состава электролита. Эти электролиты обеспечивают более высокую катодную плотность тока, что позволяет в 1,3–1,5 раза повысить производительность хромирования.

Во-вторых, в ремонтном производстве применяют *холодные электролиты*, например, тетраоксаматные с рабочей температурой 17–23 °С. Процесс хромирования ведется при высокой плотности тока (50–100 А/дм²) и позволяет получать качественные покрытия с большой производительностью и низкими внутренними напряжениями. При выборе холодных электролитов следует учитывать необходимость применения холодильных агрегатов для поддержания низкой температуры.

Осталиванием называют процесс электролитического осаждения железа из водных растворов хлористого или сернистого железа. Электролитически осажденное железо по своему химическому составу подобно малоуглеродистой стали, а по свойствам (твердости, износостойкости) приближается к свойствам среднеуглеродистой стали, поэтому процесс получил название осталивания.

Осталивание как восстановление изношенных деталей производят в хлористых, сернистых 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.

Наиболее высокие показатели (твердость, износостойкость и др.) имеют покрытия, полученные в горячих хлористых ваннах, содержащих хлористые Fe, Na и Mg, а также HCl ($T = 60 \dots 80$ °С, $I_k = 10 \dots 50$ А/дм²). В качестве растворимого анода применяют малоуглеродистую сталь.

Достоинства:

- 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.

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 электролита, температуру и плотность тока, можно регулировать эксплуатационные свойства покрытий.

При выборе деталей для восстановления осталиванием 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 осталивания следует подвергать низкому отпуску (при температуре 300–350 °С).

Осталивание применяют для восстановления изношенных рабочих поверхностей ответственных чугунных и стальных деталей (шеек валов, пальцев и др.), посадочных поверхностей валов и осей, гнезд под подшипники.

Перспективным направлением повышения износостойкости восстанавливаемых деталей является нанесение *композиционных электрохимических покрытий*. Введение в состав электролита на основе солей Ni или Cr дисперсных (порошкообразных) частиц (диаметром 1–3 мкм) оксидов, карбидов, нитридов, боридов и др. позволяет значительно упрочнить покрытия. Следует отметить, что эти частицы чисто механически увлекаются катионами (при постоянном перемешивании электролита) и осаждаются на восстанавливаемой поверхности, зарастаясь слоем металла.

Для повышения износостойкости покрытий на основе Ni используют SiC, Al₂O₃, Cr₂O₃, TiB₂ и др., для обеспечения эффекта самосмазывания покрытий из Ni и Cr применяют частицы твердых смазок (графита, MoS₂, фторопласта-4). Эти покрытия обеспечивают увеличенный ресурс элементов коробок передач и сцепления автотранспортных средств и дорожных машин.

Принцип получения *электрохимических полимерных* покрытий состоит в том, что в ванну с электролитом вводят раствор или расплав мономера. При прохождении постоянного электрического тока происходит электрохимически инициированная полимеризация или поликонденсация с образованием на поверхности электрода осадка высокомолекулярного соединения. В некоторых случаях в раствор или расплав вводят дополнительно модификаторы.

СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОСАДКИ МЕЖДУ СОПРЯЖЕННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ДЕТАЛЕЙ

Способ ремонтных размеров состоит в том, что восстанавливают посадку путем механической обработки наиболее сложной детали и замены сопряженной с ней детали новой, обеспечивая требуемый зазор между деталями. Он достаточно широко используется при ремонте транспортных средств и различных машин.

Для создания необходимого количества запасных частей с учетом потребностей ремонтного производства, а также для его технологической оснастки разрабатывают системы так называемых ремонтных размеров. При этом различают *стандартные, регламентированные* и *свободные* ремонтные размеры.

В рамках отрасли разрабатывают 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* (только в ремонтном производстве). Она предусматривает механическую обработку сложной детали узла и подгонку по месту новой (менее сложной) детали до необходимых размеров. В этом случае практически невозможно предварительно подготовить новые детали с окончательными размерами.

В системах стандартных и регламентированных ремонтных размеров восстанавливаемая деталь, которая подвергается механической обработке, может иметь несколько ремонтных размеров (1-й, 2-й и т. д.). Ее обработку ведут до тех пор, пока не будет достигнут последний ремонтный размер детали.

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 достаточной 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;

d_{p1} – размер после обработки (первый ремонтный размер);

δ' – толщина слоя, снятого в результате обработки;

δ'' – толщина износного слоя.

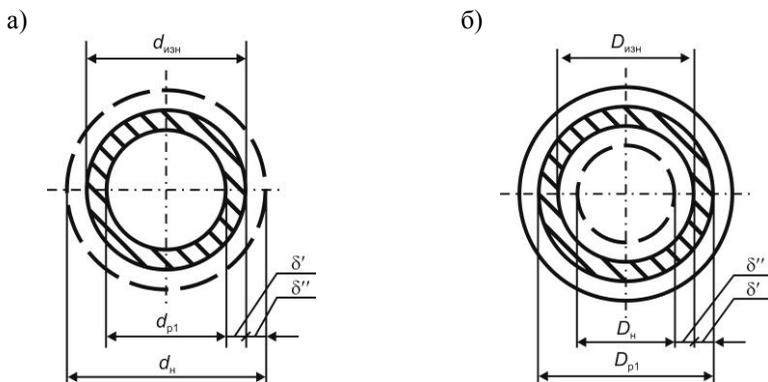


Рисунок 9.1 – Схемы к определению ремонтного интервала:
а – для вала; б – для отверстия

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 % их номинального размера (исходя из условия прочности). Дальнейшее уменьшение диаметра шейки разрешают только при наличии расчета, доказывающего возможность намечаемого уменьшения.

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 послед-

ствия 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 (с учетом формулы (9.1))

$$d_{p1} = d_n - 2(d' + d'');$$

– для отверстий

$$D_{p1} = D_n + 2(d' + d''),$$

где D_n – номинальный диаметр отверстия.

Толщину слоя металла, снятого в процессе обработки δ' , т. е. припуск при обработке вала под ремонтный размер, определяют из выражения

$$d' = R_z + T + y + E,$$

где R_z – высота микронеровностей изношенной поверхности;

T – толщина дефектного слоя поверхности;

y – величина прогиба вала;

E – величина эксцентриситета, обусловленная неточностью базирования вала при обработке на станке.

Как правило, величина припуска при чистовой обточке и расточке составляет 0,05–0,1 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 находит применение для важных деталей автотранспортных средств (блоков и гильз цилиндров двигателей, коленчатых и распределительных валов и др.).

К недостаткам способа следует отнести снижение ресурса восстановленных сопряжений по сравнению с новыми, поскольку в результате механической обработки под ремонтный размер уменьшается твердость и, как следствие, износостойкость материала детали. В качестве примера можно привести данные по работоспособности двигателя внутреннего сгорания после восстановления под ремонтный размер шеек коленчатого вала (двигателя ЗИЛ-130). Видно, что уменьшение твердости шеек (таблица 9.1) ведет к существенному снижению ресурса работы двигателя внутреннего сгорания (таблица 9.2). Поэтому для обеспечения работоспособности отремонтированного агрегата (хотя бы 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 шейки	53	52	49	35	34

Таблица 9.2 – Ресурс работы двигателя после восстановления

В тысячах километров

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	73,3	71,3	52
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.

Способ постановки дополнительной ремонтной детали (рисунок 9.2) состоит в том, что в сопряжение для компенсации износа вводят дополнительную деталь (компенсатор износа). Этот способ довольно широко применяют в ремонтном производстве, восстанавливая посадочные поверхности под подшипники качения на валах и в корпусных изделиях, отверстия с изношенной резьбой, блоки зубчатых колес и др.

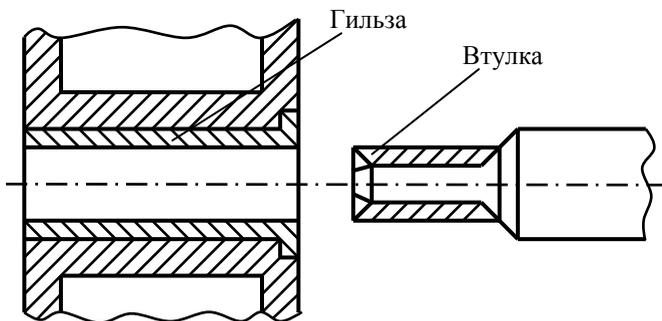


Рисунок 9.2 – Схема способа постановки дополнительной ремонтной детали

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.

Дополнительную деталь изготавливают в виде гильзы, втулки, резьбового вкладыша и т. д. Сборку дополнительной и восстанавливаемой деталей осуществляют, как правило, под прессом. При этом следует учитывать изменение размеров дополнительной детали, например, при напрессовке втулки на вал увеличивается ее наружный диаметр, а при запрессовке гильзы в отверстие уменьшается ее внутренний диаметр.

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 следующей формуле:

$$T = 10^{-3} K \frac{\Delta + S}{\alpha d},$$

где $K=1,15\dots1,30$ – коэффициент, учитывающий изменение температуры детали в процессе сборки;

Δ – максимальный расчетный натяг, мкм;

S – гарантированный зазор, мкм;

α – коэффициент линейного термического расширения материала дополнительной детали;

d – диаметр сопряжения, мм.

Технологический процесс восстановления изношенной поверхности шейки вала состоит из следующих операций:

1) механическая обработка изношенной поверхности вала по седьмому качеству точности с шероховатостью $R_a = 1,25\dots0,32$ мкм;

2) напрессовка на вал ремонтной втулки;

3) фиксация втулки (при необходимости) за счет установки штифтов или винтов, путем склеивания или сварки;

4) контроль качества соединения втулки и вала;

5) механическая обработка ремонтной втулки с требуемой точностью.

Способ замены части детали нередко используют в ремонтном производстве для восстановления дорогостоящих деталей, например, блоков шестерен коробки передач. По этому способу изношенную часть отделяют от детали, а на ее место ставят заготовку, из которой механической обработкой изготавливают заменяемую часть ремонтируемой детали. Заготовку соединяют с восстанавливаемой деталью напрессовкой, сваркой или склеиванием.

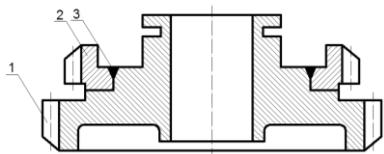


Рисунок 9.3 – Схема восстановления блока шестерен заменой неисправного зубчатого венца:

1 – основная часть блока; 2 – замененный венец; 3 – сварочный шов

На рисунке 9.3 представлена схема восстановления блока зубчатых колес, в котором зубчатый венец 2 заменен новым. Для этого изношенный венец срезают, затем напрессовывают заготовку, дополнительно фиксируя ее сварочным швом, после чего нарезают новые зубья. Для упрочнения восстановленной детали ее подвергают закалке, как правило, ТВЧ.

Между тем, наиболее эффективным способом восстановления посадок является восстановление первоначальных (номинальных) размеров сопрягаемых деталей. Используя известные методы наращивания слоев металла на изношенные поверхности, можно не только сохранить, но и увеличить межремонтный ресурс сопряжений.

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ, ОСНОВАННЫЕ НА ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ 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 повысить ресурс детали даже в сравнении с ресурсом новой детали.

Одним из них является восстановление деталей пластическим деформированием. Этот метод основан на пластическом деформировании материала детали, его перераспределении и необратимом изменении формы и размеров детали без изменения ее массы и без нарушения ее сплошности. В результате приложения внешней нагрузки осуществляется деформирование детали за счет перераспределения материала на изношенную поверхность детали.

Этот метод можно использовать 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).

Детали из низкоуглеродистых сталей, имеющих твердость до 30 HRC, а также из цветных металлов и сплавов, как правило, деформируют без предварительной термообработки.

Для снижения усилий деформирования используют нагрев детали, температура которого зависит от материала и конфигурации детали, характера и места износа. Как правило, в нагретом состоянии восстанавливают детали из средне- и высокоуглеродистых сталей.

Ранее было отмечено, что пластическое деформирование металла сопровождается его упрочнением, а также повышением твердости при снижении деформационной способности.

Пластическое деформирование применяют для *восстановления формы и размеров* деталей, а также для *повышения физико-механических свойств* материалов 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.

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 изложена в разд. 5. Естественно, следует учитывать особенности ППД при восстановлении изношенных деталей и упрочнении новых.

Восстановление осадкой. Ее используют для увеличения наружного и уменьшения внутреннего диаметров деталей типа втулок, а также увеличения наружного диаметра монолитных деталей за счет уменьшения их длины (рисунок 10.1, а).

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.

Восстановление выдавливанием. Его применяют для увеличения наружных размеров деталей за счет выдавливания металла из нерабочей зоны (рисунок 10.1, б).

При восстановлении детали *выдавливанием* направления усилия и деформации также взаимно 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.

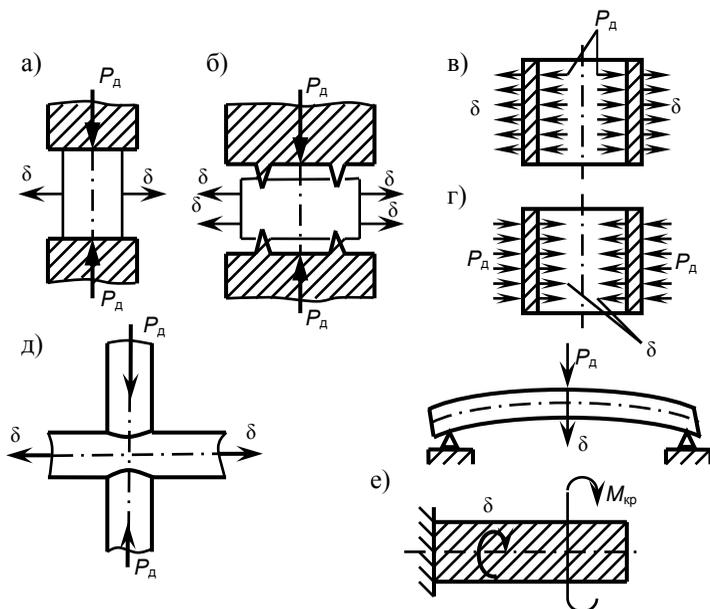


Рисунок 10.1 – Принципиальные схемы восстановления деталей пластическим деформированием:
 a – осадка; b – выдавливание; $в$ – раздача; $г$ – обжатие; $д$ – вытяжка; e – правка
 $(P_d$ – внешняя сила, δ – деформация)

Восстановление *раздачей* (рисунок 10.1, *в*) применяют для увеличения внутреннего диаметра полых цилиндрических деталей (втулок, пальцев и др.) без изменения высоты. Как видно из рисунка, для этого используют радиально направленные усилия, совпадающие с направлением деформирования детали. Раздачу проводят под постоянный размер продавливанием шарика или пуансона или под любой размер – развальцовкой отверстия. Увеличение диаметра зависит от упругих характеристик металла, температуры предварительного нагрева и диаметра пуансона. Раздачу осуществляют двумя способами:

- 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.

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 (рисунок 10.1, з). Обжатие 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. Для снижения усилий продавливания детали матрица имеет входное отверстие, сужающееся под углом 7–8°, калибрующую часть и выходное расширяющееся отверстие. 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.

Вытяжку (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.

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. При *механической правке* (без нагрева) применяют нагрузку к деформированной детали в месте наибольшего искривления (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.

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 стальную деталь подвергают быстрому локальному нагреву (до температур 800–900 °С) в месте наибольшего прогиба с выпуклой стороны. Эффективность этого способа правки можно повысить 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 не требуется прессового оборудования или установок для наращивания слоя металла.

Восстановление детали с помощью ТПД происходит за счет направленной усадки детали в радиальном направлении, управляемой с помощью ее термообработки. За один цикл термовоздействия, включающий нагрев и охлаждение, ее усадка достигает 1,5 %.

На рисунке 10.2 представлена принципиальная схема восстановления внутренней поверхности втулки с помощью жесткой матрицы. Для нагрева используют индуктор ТВЧ, для охлаждения – устройство с водяным душем (спрейер). Стальную деталь нагревают токами высокой частоты до температур 700–750 °С, после взаимодействия с матрицей она осаживается в радиальном направлении (к оси) и охлаждается до 400–550 °С. После ТПД выполняют необходимую механическую обработку поверхностей детали. Отметим, что стоимость восстановления деталей методом ТПД не превышает 60 % стоимости новых деталей.

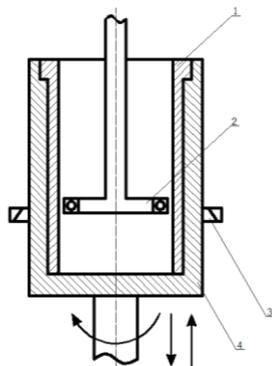


Рисунок 10.2 – Схема восстановления внутренней поверхности втулки в жесткой матрице:

- 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – индуктор;
- 3 – устройство для охлаждения матрицы;
- 4 – матрица

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

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 и герметики, материалы для покрытий. Следует отметить, что композиционные материалы триботехнического назначения на основе полимеров для восстановления деталей, как правило, не используются.

11.1 Восстановление деталей с применением клеевых материалов и композиций

Клеевые технологии восстановления деталей обеспечивают возможность устранения таких дефектов, как трещины размером до 150 мм, пробоины площадью до $2,5 \text{ см}^2$, 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 применяются при ремонте деталей, работающих в диапазоне температур от –70 до +120 °С.

Их основным недостатком является исходная токсичность компонентов.

В настоящее время при ремонте машин все шире 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* 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.).

Они 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.

ХМС не требует термического воздействия на восстанавливаемую поверхность и проводится на воздухе без какой-либо защитной среды и специального 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 композиционных материалов.

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.

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.

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 ремонтных материалах, которые свидетельствуют об их довольно широких возможностях.

Таблица 11.3 – Физико-механические и технологические характеристики ремонтных полимерных 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 ремонтных 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 Вика)	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

Перед применением ХМС поверхность детали должна быть предварительно механически очищена и обезжирена. Композиционные материалы 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.

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 восстанавливаемых 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 деталей с применением герметиков (анаэробных материалов)

Герметики представляют собой однокомпонентные материалы (в исходном состоянии жидкие или вязкие композиции), способные быстро отверждаться в зазорах между сопрягаемыми металлическими поверхностями. Их основу составляют акриловые и сложные метакриловые эфиры и перекись водорода.

Способности анаэробных герметиков 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.

Анаэробные герметики (АГ) имеют следующие достоинства:

- 1) возможность герметизации соединений деталей из разнородных материалов;
- 2) устойчивость к воздействию воды, нефтепродуктов и растворителей;
- 3) обеспечение герметичности в зазорах соединений до 0,2–0,5 мм;
- 4) сохранение эксплуатационных характеристик в диапазоне температур от –60 до +250 °С;
- 5) обеспечение герметичности при давлениях до 35 МПа;
- 6) незначительный расход материала и простота технологического процесса.

АГ применяют в следующих областях:

- 1) для пропитки пористого литья, сварных швов и прессованных изделий;
- 2) контровки и стопорения резьбовых соединений;
- 3) фиксации подвижных соединений;
- 4) уплотнения резьбовых и фланцевых соединений.

АГ не чувствительны к воздействию воды, минеральных масел, топлив и растворителей. В большинстве своем они не токсичны, 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 напря-

жений, которые неизбежны при использовании нагрева для получения пресовых посадок. После выпрессовки посадочная поверхность остается чистой, и при ремонте узла достаточно повторно нанести герметик.

Скорость отверждения АГ и время достижения максимальной прочности соединения зависят от температуры окружающей среды. При температурах ниже 15 °С замедляется их полимеризация, что обуславливает необходимость применения специальных активаторов.

В ремонтном производстве широко применяют анаэробные составы типа ДН, Анатерм, Унигерм и др. (таблицы 11.5 и 11.6).

Некоторые герметики (Унигерм-2М и Унигерм-11) полимеризуются 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.

По влиянию на скорость отверждения герметика 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, пластмассовые изделия).

Для правильного выбора марки герметика необходимо учитывать его вязкость и размер зазора между уплотняемыми деталями (см. таблицу 11.5).

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
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

Некоторые АГ обладают свойством ускоренного отверждения (см. таблицу 11.6), 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 тща-

тельно очищают. Окалину и ржавчину удаляют механическим путем, масляные и другие загрязнения – с помощью растворителей (ацетона, бензина, хлорсодержащих растворителей). Детали после гальванического покрытия можно герметизировать без предварительного обезжиривания. Неметаллические материалы, отличающиеся большой пористостью, зачищают без обезжиривания.

Таблица 11.6 – Физико-механические свойства анаэробных герметиков ускоренного отверждения

Герметик	Прочность при сдвиге через 24 ч, МПа	Максимальный размер уплотняемого зазора, мм	Температурный диапазон эксплуатации, °С
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.

11.3 Восстановление деталей с помощью 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 допускаемый износ деталей может быть установлен в пределах толщины нанесенного слоя покрытия (в интервале 0,3–0,8 мм). Очень важно, что при ремонте вышедших 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).

В целом полимерные покрытия (ПП) целесообразно классифицировать по следующим признакам:

1) *по назначению* различают антикоррозионные, электроизоляционные, декоративно-защитные, триботехнические ПП;

2) по типу полимера различают покрытия из термопластичных и термоактивных полимеров;

3) по исходному состоянию полимера разделяют покрытия, сформированные из раствора (или суспензии), пленки и порошка;

4) по температуре предварительного нагрева детали различают процессы нанесения покрытий на нагретую (до температуры $T_{дет} > T_{пл}$) и холодную ($T_{деп} \approx T_{окр.ср}$) деталь;

5) по методу нанесения порошковых полимеров различают покрытия, полученные:

- окутанием 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 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 ($T > T_{пл}$);

4) механическую обработку поверхности покрытия.

Первая стадия – *подготовка поверхности детали* – включает:

а) очистку от загрязнений;

б) механическую обработку;

в) термообработку;

г) создание промежуточных адгезионноактивных подслоев;

д) защиту непокрываемых участков поверхности детали.

От степени подготовки поверхности детали во многом зависит качество ПП. Кроме того, адгезионная прочность покрытий (т. е. прочность сцепления покрытий с поверхностью металла) зависит от шероховатости и чистоты поверхности детали.

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 следы 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 ПП, 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:

1) прокаливание (после очистки) деталей при температуре 350–400 °С, чтобы сжечь все виды консистентных смазочных материалов, которые могут остаться на поверхностях деталей;

2) 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 применяется в специальных аппаратах, схема одного из которых представлена на рисунке 11.1, а.

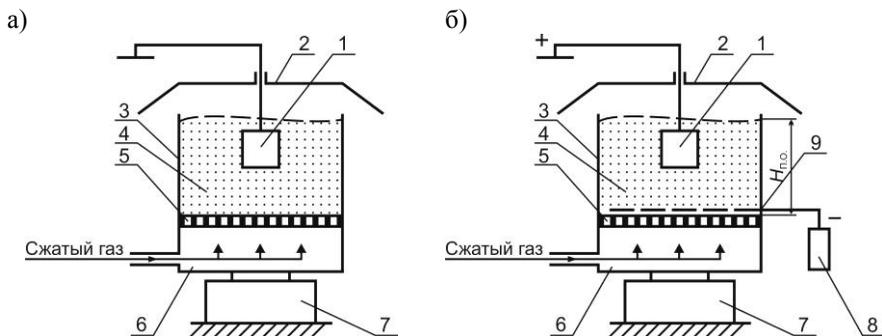


Рисунок 11.1 – Схема аппаратов для нанесения покрытий из псевдооживленного слоя порошкообразного полимера в электрическом поле (б) и без поля (а):

- 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 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 налипает 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 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 11.1, 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 ($p_v > 10^{18}$ Ом·см) препятствует интенсивному стеканию электрического заряда, и слой заряженных частиц полимера удерживается на поверхности детали длительное время, достаточное для помещения 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 11.2), который состоит из диэлектрического корпуса, канала подачи воздушно-порошковой смеси, коронирующего электрода, соединенного с источником высокого напряжения, рассекателя и рукоятки с заземленной металлической накладкой.

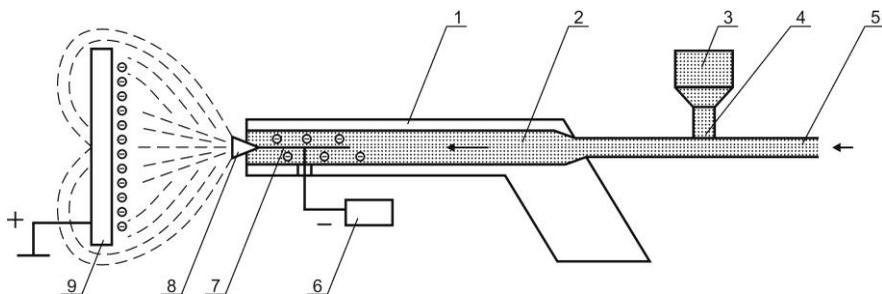


Рисунок 11.2 – Схема распылителя для нанесения покрытий электрогазоструйным напылением порошкообразного полимера:

- 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 ПП. *Основными параметрами*, определяющими эксплуатационные свойства и технические характеристики ПП, являются *температура* и *время термического воздействия* при их формировании. Поэтому выбор оптимальных температурно-времен-

ных режимов формирования ПП является очень ответственной задачей. На рисунке 11.3 представлены данные по влиянию температуры формирования

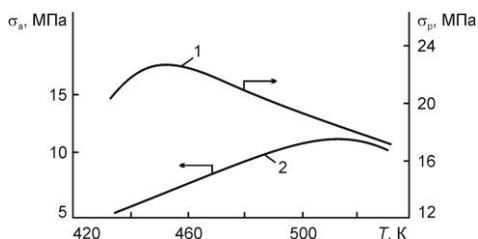


Рисунок 11.3 – Влияние температуры формирования на свойства покрытий из полиэтилена: 1 – прочность покрытий на разрыв; 2 – прочность адгезионных соединений при нормальном отрыве

покрытий на их физико-механические и адгезионные характеристики. Экстремальный характер зависимости свидетельствует о необходимости точного выбора параметров, обеспечивающих формирование беспористого сплошного покрытия, обладающего высоким уровнем физико-механических свойств и прочным сцеплением с поверхностью детали.

Каждая из перечисленных стадий является достаточно значимой и влияет на эксплуатационные характеристики ПП. Но самой главной является стадия формирования ПП при термическом воздействии, поскольку именно на этой стадии происходит оплавление 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 ПП и металлических. Для металлических покрытий стадия оплавления наносимого металла на поверхности детали вообще отсутствует, а формирование слоя покрытия происходит при переносе и растекании капель расплава на покрываемой поверхности.

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 ПП), чтобы избежать перегрева локальных участков поверхности покрытий, которые могут привести к их отслаиванию.

Из опыта применения ПП 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 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 ПП (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 ПП 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 нагрузки, достигающие 20 МПа (при скоростях скольжения до 1 м/с), т. е. на порядок 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 ПП 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 контротела (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.

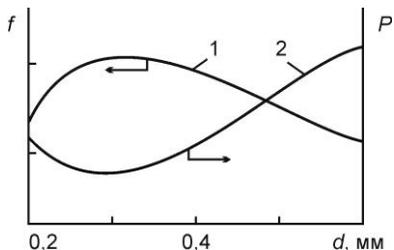


Рисунок 11.4 – Влияние толщины покрытий из поликарбоамида на коэффициент трения (1) и нагрузочную способность покрытий (2)

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 11.4). С уменьшением толщины покрытий (меньше оптимальных значений) снижается демпфирующая способность покрытий и растет жесткость системы,

что вызывает рост коэффициента трения. При толщине покрытий, превышающей оптимальную, коэффициент трения возрастает вследствие ухудшения теплоотвода из зоны трения.

Область применения антифрикционных ПП, как уже отмечалось, ограничена допускаемыми величинами нагрузочно-скоростных параметров в узлах машин и механизмов: $[p] = 20 \text{ МПа}$; $[v] = 1 \text{ м/с}$.

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 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 это-

го 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 ПП. В случае необходимости повышения долговечности и ремонтпригодности вала наносят ПП на его поверхность в зоне контакта с подшипником.

Очень важным достоинством ПП является высокий уровень ремонтпригодности. При восстановлении ПП следует 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 ПП следует заменить новыми даже в тех случаях, когда на них не обнаружено дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 энергосбережением и экологической безопасностью, отражено в планах отечественной концепции развития науки и техники. Во всех областях науки, отвечающих за создание конкурентоспособной мобильной техники, намечены важные мероприятия, способствующие решению этих проблем.

В области материаловедения предполагается расширить разработки и внедрение материалов нового поколения, обеспечивающих самодиагностику, самовосстановление и авторегуляцию физико-механических и других эксплуатационных характеристик при изменении условий работы машин; новых конструкционных материалов, многократно превосходящих по своим характеристикам имеющиеся материалы (износо- и коррозионностойких, сверхпрочных и сверхтвердых); новых полимерных композитов высокой удельной прочности с комплексом уникальных свойств.

В области освоения прогрессивных технологий продолжается развитие эффективных методов получения наноструктурных материалов для силовых элементов конструкций машин; технологий материалов с новыми свойствами для нанoeлектронных систем управления; плазменных и лазерных технологий для производства высококачественных сталей и специальных сплавов для ответственных деталей и узлов машин.

При проектировании и конструировании машин поставлена задача на базе компьютерных технологий создать методы и средства прогнозирования, оценки и контроля надежности и безопасности машин по физическим моделям обеспечения их работоспособности.

В области совершенствования конструкций машин планируется создание и освоение новых агрегатов и узлов, в том числе гибридных двигателей, новых типов комбинированных передач, узлов бесступенчатого регулирования скоростных характеристик, электронных и мехатронных систем управления и диагностирования, обеспечивающих повышение конкурентоспособности машин и механизмов.

Вполне очевидно, что спектр современных методов повышения работоспособности машин не ограничивается приведенными в пособии сведениями, а постоянно расширяется и совершенствуется. Поэтому инженер-механик, специализирующийся в области проектирования, модернизации и эксплуатации машин, *обязан постоянно пополнять свои знания*, не ограничиваясь багажом высшей школы, и расширять свой кругозор, изучая и анализируя патентную и научно-техническую литературу в своей и смежных областях машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Армированные пластики / В. А. Бунаков [и др.]. – М. : Изд-во МАИ, 1997. – 404 с.
- 2 **Астахов, М. В.** Перспективные материалы / М. В. Астахов, С. В. Шилько. – Витебск : УО ВГТУ, 2009. – 542 с.
- 3 **Баловнев, В. И.** Многоцелевые дорожно-строительные и технологические машины : учеб. для вузов / В. И. Баловнев. – Омск–Москва : ОАО «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. – Мн. : 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.** Композиционные материалы и покрытия на основе полимеров / В. А. Довгяло, О. Р. Юркевич. – Минск : Навука і тэхніка, 1992. – 256 с.
- 8 **Зорин, В. А.** Основы работоспособности технических систем / В. А. Зорин. – М. : Магистр-Пресс, 2005. – 536 с.
- 9 **Ивашков, И. И.** Монтаж, эксплуатация и ремонт подъемно-транспортных машин : учеб. для вузов / И. И. Ивашков. – М. : Машиностроение, 1991. – 400 с.
- 10 **Кенько, В. М.** Неметаллические материалы. Методы обработки : учеб. пособие / В. М. Кенько. – Мн. : Дизайн ПРО, 1998. – 240 с.
- 11 **Ксенович, И. П.** Наземные тягово-транспортные системы : энциклопедия / И. П. Ксенович, В. А. Гоберман, Л. А. Гоберман. – М. : Машиностроение, 2003. – Т.1. – 744 с., Т.2. – 880 с., Т.3. – 788 с.
- 12 **Максименко, А. Н.** Эксплуатация строительных и дорожных машин : учеб. / А. Н. Максименко. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.
- 13 **Материаловедение : учеб. / В. А. Струк [и др.].** – Мн. : ИВЦ Минфина, 2008. – 519 с.
- 14 **Материаловедение : учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.].** – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 648 с.
- 15 **Ремонт строительных, путевых и погрузочно-разгрузочных машин : учеб. для вузов / А. В. Каракулев [и др.].** – М. : Транспорт, 1988. – 303 с.
- 16 **Решетов, Д. Н.** Надежность машин / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. – М. : Высш. шк., 1988. – 238 с.

- 17 Технические основы создания машин : учеб. пособие / В. А. Довгяло [и др.] ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2009. – 330 с.
- 18 Технологические методы обеспечения надежности деталей машин : учеб. пособие / И. М. Жарский [и др.]. – Мн. : Выш. шк., 2005. – 299 с.
- 19 Технология машиностроения / Л. В. Лебедев [и др.]. – М. : Издат. центр «Академия», 2006. – 528 с.
- 20 **Труханов, В. М.** Надежность изделий машиностроения. Теория и практика / В. М. Труханов. – М. : Машиностроение, 1996. – 336 с.
- 21 **Хасуи, А.** Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.
- 22 Эксплуатация дорожных машин : учеб. для вузов / А. М. Шейнин [и др.]. – М. : Транспорт, 1992. – 328 с.