

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технологии металлов

УДК 620.22 (07)
ББК 30.3я7
С56

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь
по образованию в области сельского хозяйства в качестве
пособия для студентов высших учебных заведений
специальности 1-74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее
производство в сельском хозяйстве»*

Минск
БГАТУ
2011

Авторы:

кандидат технических наук, доцент *В. Р. Калиновский*,
доктор технических наук, профессор *В. М. Катцевич*,
старший преподаватель *В. К. Корнеева*,
старший преподаватель *Д. И. Кривальцевич*

Рецензенты:

доктор технических наук, доцент кафедры «Материаловедение
в машиностроении» Белорусского национального технического
университета *В. М. Константинов*;
кандидат технических наук, первый заместитель директора –
заместитель директора по науке
ГНУ «Институт порошковой металлургии» *В. В. Савич*

С56

Современные материалы : пособие / В. Р. Калиновский
[и др.]. – Минск : БГАТУ, 2011. – 252 с.
ISBN 978-985-519-425-6.

В пособии рассматриваются материалы, используемые в современном машиностроении, их свойства, области применения и технологии обработки. Из металлических материалов, используемых для производства деталей современных машин, рассмотрены традиционные стали и сплавы легких металлов, доля которых в числе используемых материалов постоянно возрастает. Из неметаллических материалов рассмотрены материалы на основе полимеров и керамики. В современном машиностроении широко используются изделия порошковой металлургии и композиционные материалы. В пособии представлены некоторые материалы с особыми свойствами, а также рассмотрены основные представления о нанотехнологиях и перспективы разработки наноматериалов.

УДК 620.22 (07)
ББК 30.3я7

ISBN 978-985-519-425-6

© БГАТУ, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	8
1.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ	8
1.2. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КРИТЕРИИ ЕЕ ОЦЕНКИ.....	9
2. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	16
2.1. СТАЛИ	16
2.1.1. Конструкционные стали	21
2.1.2. Инструментальные стали.....	39
2.2. АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ.....	43
2.3. МАГНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ.....	52
2.4. ТИТАН И ЕГО СПЛАВЫ.....	57
3. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	63
3.1. ПОЛИМЕРЫ.....	64
3.1.1. Классификация полимеров.....	66
3.1.2. Свойства полимеров.....	69
3.2. ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ (ПЛАСТМАССЫ, ПЛАСТИКИ).....	74
3.2.1. Состав, классификация, свойства и применение пластмасс	75
3.2.2. Термопластичные пластмассы	76
3.2.3. Терморезистивные пластмассы.....	80
3.3. РЕЗИНОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	82
3.3.1. Технология изготовления резиновых изделий.....	86
3.4. ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ПЛАСТМАССЫ	88
3.5. ВОЛОКНА И ТКАНИ	90
3.6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС	94
3.6.1. Получение изделий из термопластов.....	96
3.6.2. Получение изделий из реактопластов	100
3.6.3. Обработка пластмасс резанием	107
3.7. МЕТОДЫ СОЕДИНЕНИЯ ПЛАСТМАСС	109

3.8. ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС	115
3.9. ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	121
3.9.1. Клеящие материалы.....	122
3.9.2. Герметики.....	130
3.10. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	133
3.11. НЕОРГАНИЧЕСКОЕ СТЕКЛО.....	138
4. ИЗДЕЛИЯ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ.....	147
4.1. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ И ИХ СВОЙСТВА.....	148
4.2. ФОРМОВАНИЕ ПОРОШКОВ.....	152
4.3. СПЕКАНИЕ	158
4.4. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	160
4.4.1. Порошковые антифрикционные материалы.....	160
4.4.2. Фрикционные материалы.....	164
4.4.3. Электротехнические материалы.....	166
4.4.4. Порошковые конструкционные материалы.....	169
4.4.5. Порошковые инструментальные материалы	171
4.4.6. Пористые порошковые материалы.....	178
5. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	192
5.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ.....	192
5.2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ.....	196
5.3. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	200
5.4. КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	208
5.5. РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	212
6. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ.....	217
6.1. АМОΡФНЫЕ СПЛАВЫ.....	217
6.2. МАТЕРИАЛЫ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ	224
6.3. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ	227
ЛИТЕРАТУРА	248

ВВЕДЕНИЕ

Материалы (вещества, предназначенные для производства чего-либо) — это совокупность предметов труда, которые человек преобразует в процессе труда, превращая в его продукты (предметы потребления и средства производства). При этом под веществом понимают вид материи, совокупность дискретных (прерывных) образований (атомы, молекулы и то, что из них построено), обладающих массой покоя.

Используемые материалы являются отличительной чертой каждой цивилизации. С ее развитием в их число включаются новые материалы. Характерной чертой современного этапа развития общества является то, что независимо от общественного строя в условиях массового потребления и массового производства устанавливаются рыночные отношения. В этой связи ограниченный срок службы различных изделий и машин закладывается еще на стадии проектирования. При этом моральное старение различных изделий происходит значительно раньше физического и принцип «одноразовости» широко используется при производстве различных изделий, позволяя увеличить число применяемых материалов.

С каждым годом в различных отраслях производства увеличивается число используемых материалов и веществ, разнообразных по своим свойствам и часто находящихся нетрадиционное применение. При этом разрабатываются качественно новые материалы, как правило, обладающие уникальными свойствами, и улучшаются свойства ранее известных материалов. Одновременно развиваются и создаются новые технологии совершенствования свойств материалов.

Главной задачей данного курса является изучение основных тенденций современного развития технологии материалов, применяемых в машиностроении. К числу современных материалов относятся ряд металлов и сплавов, удовлетворяющих условиям эксплуатации современной техники, а также неметаллические и композиционные материалы.

Традиционно материальную основу машиностроительного производства составляют металлы и сплавы. В настоящее время учеными изучены возможности повышения эксплуатационных характеристик стальных деталей различными методами термической обработки и разработаны разнообразные технологии упрочнения. Поэтому при выборе сталей в качестве материалов для изготовления деталей современных машин необходимо учитывать современные знания о возможности повышения эксплуатационных характеристик деталей. Среди используемых сталей имеется много материалов с улучшенными свойствами, а также новых материалов, которые получили распространение в последние годы. К новым материалам относятся, в частности, порошковые материалы, микрокристаллические и аморфные сплавы, особо чистые металлы, сплавы с особыми физическими свойствами и т. п.

При выборе новых материалов для изготовления тех или иных видов изделий необходимо учитывать экономическую целесообразность их использования, которая, в первую очередь, определяется стоимостью материала, а также степенью его дефицитности; расходом материала, идущего на изготовление изделия; стоимостью энергетических затрат; надежностью и долговечностью изделия, зависящими от эксплуатационных свойств материала и т. д.

Наряду с увеличением использования высококачественных материалов на основе железа увеличивается производство и применение титана, алюминия, магния. Легкие, прочные, коррозионно-стойкие сплавы позволяют в 2...3 раза «облегчить» станки и автомашины, значительно сократить расходы на ремонт и горючее. Следует отметить, что использование в промышленности сплавов из легких прочных металлов заметно расширит ее сырьевую базу, поскольку титан, алюминий, магний и другие металлы можно получать из бедных и сложных по составу руд, а также отходов производства, идущих в отвалы. В новых отраслях металлургии есть возможность применить экологически чистые технологии. Изучение мировых тенденций использования материалов показывает, что через 15...20 лет все развитые страны перейдут на массовое использование металлических материалов на основе алюминия, титана, магния, что, в первую очередь, обусловлено нарастающим истощением запасов традиционного минерального сырья, нефти и газа. Следует отметить, что многие детали в современных машинах и механизмах уже изготавливают из полимеров и керамики.

Целесообразность (техническая и экономическая) применения неметаллических материалов определяется, с одной стороны, постоянным дефицитом на металлы и сплавы, с другой стороны, достаточной и (в некоторых случаях) практически неисчерпаемой сырьевой базой неметаллических материалов. В народном хозяйстве постоянно возрастает использование пластмасс и композиционных материалов на их основе, что позволяет значительно сократить расход металлических материалов и энергоресурсов, уменьшить трудоемкость изделий.

При этом непрерывно будет расти применение технической керамики, создаваемой на основе самых распространенных в природе элементов (азота, углерода, кремния, кислорода и др.), поскольку они имеют практически неограниченную сырьевую базу.

Новый класс материалов, который разрабатывается в последние годы, представляют композиты — материалы с особой структурой на основе металлов, керамики, полимеров, стекла и других веществ.

Все шире внедряются в народное хозяйство наноматериалы. Проводятся интенсивные исследовательские работы по созданию нанотехнологий.

В условиях массового потребления производство материалов оказывает негативное воздействие на экологию. Кроме того, созданы и используются материалы, структура которых не позволяет, в принципе, их утилизировать. Поэтому, при внедрении новых материалов и технологий приходится в ряде случаев осуществлять дополнительные затраты для улучшения экологической обстановки и сокращения других негативных последствий.

1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Конструкционные материалы — это материалы, отличающиеся повышенной конструкционной прочностью. Различают металлические, неметаллические и композиционные конструкционные материалы. Металлические конструкционные материалы подразделяют:

- 1) по технологическому принципу (литейные, спеченные и др.);
- 2) по условиям эксплуатации (жаропрочные, криогенные и др.);
- 3) по составу (сплавы алюминия, титана и т. п.);
- 4) по структурному состоянию (стали аустенитные, ферритные и др.);
- 5) по типу упрочнения (дисперсионно-твердеющие, дисперсно-упрочненные и др.).

К неметаллическим конструкционным материалам относят *пластмассы, стекла, керамику, огнеупоры* и др. К композиционным конструкционным материалам относят *металлы и пластики, упрочненные волокнами* и др.

1.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

Детали машин и конструкций характеризуются большим разнообразием форм и размеров и в процессе эксплуатации подвергаются различным воздействиям. В связи с этим важным этапом разработки оптимального конструкторского решения изделия является выбор конструкционного материала, отвечающего определенным критериям.

Детали машин работают при статических, циклических и ударных нагрузках, при низких и высоких температурах, в контакте с различными средами. Эти факторы определяют требования к конструкционным материалам, основные из которых — эксплуатационные, технологические и экономические.

Эксплуатационные требования имеют первостепенное значение. Для того чтобы обеспечить работоспособность конкретных машин и приборов, материал должен иметь высокую конструкционную прочность.

Конструкционной прочностью называется комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу материала в заданных условиях эксплуатации.

Условия эксплуатации определяются рабочей средой (жидкая, газообразная, ионизированная, радиационная и др.), которая может негативно влиять на механические свойства материала. В результате химического и теплового воздействий она может вызывать повреждение поверхности вследствие коррозионного растрескивания, окисления, образования окалина и др. Для того, чтобы избежать отрицательного воздействия рабочей среды, материал должен обладать не только механическими, но и требуемыми физико-химическими свойствами (стойкостью к коррозии, жаростойкостью и т. д.). Температурный диапазон работы современных материалов достаточно широк, поэтому для обеспечения работоспособности при высокой температуре от материала требуется жаропрочность, а при низкой температуре — хладостойкость.

Технологические требования направлены на обеспечение наименьшей трудоемкости, а также простоты изготовления деталей и конструкций. Они оцениваются технологичностью материала, определяемой хорошей обрабатываемостью резанием, давлением, свариваемостью, способностью к литью, а также требуемой прокаливаемостью и отсутствием деформации и коробления при термической обработке. Технологичность материала определяет, в конечном итоге, производительность и качество изготовления деталей.

Экономические требования сводятся к тому, чтобы материал имел низкую стоимость, был доступным, но при этом обеспечивал сохранение или повышение эксплуатационных свойств деталей.

1.2. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КРИТЕРИИ ЕЕ ОЦЕНКИ

Конструкционная прочность материала — это комплексная характеристика, объединяющая критерии прочности, жесткости, надежности и долговечности.

Критерии прочности материала зависят от условий его работы. При статических нагрузках критериями прочности являются временное сопротивление σ_s и предел текучести $\sigma_{0,2}$ (σ_m), характеризующие сопротивление материала пластической деформации.

Если материал в процессе эксплуатации испытывает длительные циклические нагрузки, то критерием его прочности является предел выносливости σ_R (при симметричном круговом изгибе σ_{-1}).

По значениям выбранных критериев прочности рассчитывают допустимые рабочие напряжения. При этом, чем больше прочность материала, тем выше допустимые рабочие напряжения и меньше размеры и масса детали.

Критерий *жесткости* характеризует способность материала сопротивляться деформациям. Именно этот критерий (а не критерий прочности) определяет размеры станин станков, корпусов редукторов и других деталей, от которых в процессе эксплуатации требуется сохранение точных размеров и формы.

Для ограничения упругой деформации материал этих деталей должен обладать высоким модулем упругости, являющимся его критерием жесткости.

В свою очередь, для пружин, мембран и других чувствительных упругих элементов машин и приборов, наоборот, важно обеспечить наибольшие упругие деформации. Для материалов таких изделий критерий жесткости характеризуется высоким пределом упругости и низким модулем упругости.

Надежность — свойство материала противостоять хрупкому разрушению. Хрупкое разрушение вызывает внезапный отказ деталей в условиях эксплуатации. Оно считается наиболее опасным, поскольку происходит при напряжениях ниже расчетных и протекает с большой скоростью.

Для предупреждения хрупкого разрушения конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью (δ , ψ) и ударной вязкостью (*KCU*). Однако эти критерии надежности определяются на небольших образцах без учета условий эксплуатации конкретной детали и являются достаточными лишь для мягких малопрочных материалов. Однако для менее пластичных материалов с повышенной склонностью к хрупкому разрушению необходимо учитывать дополнительные факторы, влияющие на пластичность и вязкость, и увеличивающие вероятность хрупкого разрушения.

Это наличие концентраторов напряжений (надрезов), низкие температуры, динамические нагрузки и большие размеры деталей (масштабный фактор).

Поэтому для предотвращения внезапных поломок деталей в процессе эксплуатации необходимо учитывать трещиностойкость материала. *Трещиностойкость* — группа параметров надежности, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины.

Количественная оценка трещиностойкости основывается на линейной механике разрушения. В соответствии с ней очагами разрушения высокопрочных материалов служат небольшие трещины, которые возникают из трещиноподобных дефектов, имеющих в исходном материале (неметаллические включения, скопления дислокаций и т. п.), в процессе изготовления детали при сварке или термической обработке, а также в процессе эксплуатации машины или изделия. Трещины являются острыми концентраторами напряжений, местные (локальные) напряжения в вершине которых, могут во много раз превышать средние расчетные напряжения (рис. 1.1).

Для трещины длиной l и радиусом r (рис. 1.1) напряжение в вершине определяется зависимостью

$$\sigma_y^{\max} = 2\sigma_{\text{cp}}\sqrt{l/r}. \quad (1)$$

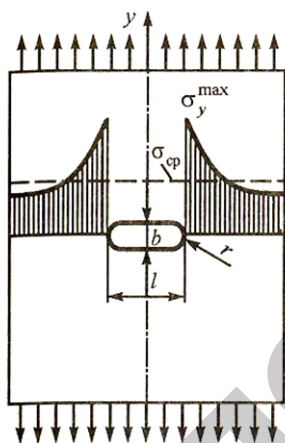


Рис. 1.1. Концентрация напряжений вблизи эллиптической трещины

Концентрация напряжений тем больше, чем длиннее трещина и острее ее вершина. Для пластичных материалов опасность таких

напряжений мала. В результате перемещения дислокаций и увеличения их плотности у вершины трещины протекает местная пластическая деформация, приводящая к затуплению вершины. Затупление (уменьшение радиуса r) приводит к релаксации (снижению) локальных напряжений и их выравниванию, при этом дефект перестает играть роль острого концентратора напряжений.

Хрупкие материалы, наоборот, чрезвычайно чувствительны к надрезам. В силу того, что дислокации заблокированы и пластическая деформация невозможна, при увеличении средних напряжений локальные напряжения σ_y^{\max} повышаются настолько, что вызывают разрыв межатомных связей и развитие трещины. Рост трещины не тормозится, как в пластичных материалах, а ускоряется. После достижения некоторой критической длины трещины наступает ее самопроизвольный лавинообразный рост, вызывающий хрупкое разрушение.

Для высокопрочных материалов, которые обладают определенной пластичностью, реальную опасность представляют трещины только критической длины $l_{\text{кр}}$. Увеличение трещины до значений $l_{\text{кр}}$ тормозится местной пластической деформацией. Однако при определенном сочетании рабочего напряжения и длины дефекта равновесное положение трещины нарушается, и происходит самопроизвольное ее развитие и разрушение материала.

Оценку надежности высокопрочных материалов по размеру допустимого дефекта (меньше критического) проводят по критериям Ж. Ирвина. Им предложено два критерия трещиностойкости, из которых наибольшее применение имеет коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины (критерий K). Он определяет растягивающие напряжения σ_y в любой точке (рис. 1.2) впереди вершины трещины, которые вычисляются по формуле:

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi x}}. \quad (2)$$

Знаменатель дроби обращается в единицу при $x \approx 0,16$, поэтому K численно равен σ_y на расстоянии $\sim 0,16$ мм от вершины трещины.

Критерий K для наиболее жесткого нагружения (плоская деформация растяжением) обозначают K_1 , а при достижении критического значения, когда стабильная трещина переходит в нестабильную — K_{1c} . При этом

$$K_{Ic} = \sigma_{cp} \sqrt{\alpha \pi l_{кр}}, \quad (3)$$

где α — безразмерный коэффициент, характеризующий геометрию трещины.

Критерий K_{Ic} , имеющий размерность МПа · м^{1/2}, показывает то, какого значения (интенсивности) достигает напряжение вблизи вершины трещины в момент разрушения, и связывает приложенное среднее напряжение с критической длиной трещины.

Значение K_{Ic} определяют экспериментально на образцах с надрезом и заранее созданной на дне этого надреза усталостной трещиной.

Значение K_{Ic} зависит от степени пластической деформации у вершины трещины (ее затупления) и характеризует сопротивление развитию вязкой трещины. По этой причине критерий K_{Ic} называют *вязкостью разрушения*. Чем больше значение K_{Ic} , тем выше надежность и сопротивление этого материала вязкому разрушению. Кроме качественной характеристики надежности, K_{Ic} дополняет параметры $\sigma_{0,2}$ и E при расчетах на прочность деталей из высокопрочных материалов (сталей с $\sigma_b \geq 1\,200$ МПа, титановых сплавов с $\sigma_b \geq 800$ МПа и алюминиевых сплавов с $\sigma_b \geq 450$ МПа). Этот критерий позволяет определить безопасный размер трещины при известном рабочем напряжении или, наоборот, безопасное напряжение при известном размере дефекта.

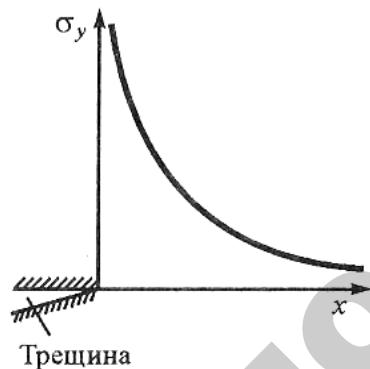


Рис. 1.2. Зависимость напряжения от расстояния до вершины трещины

Для оценки надежности материала также используют следующие параметры: ударную вязкость KCV и KCT , температурный по-

рог хладноломкости t_{50} . Однако это качественные параметры и они непригодны для расчета на прочность.

Параметром KCV оценивают пригодность материала для изготовления сосудов давления, трубопроводов и других конструкций повышенной надежности.

Параметр KCT , определяемый на образцах с трещиной усталости у основания надреза, является более показательным. Он характеризует работу развития трещины при ударном изгибе и оценивает способность материала тормозить начавшееся разрушение. Чем больше параметр KCT , определенный при рабочей температуре в условиях эксплуатации, тем выше надежность материала. Так же как и K_{Ic} , KCT учитывают при выборе материала для конструкций особо ответственного назначения.

Порог хладноломкости t_{50} характеризует влияние снижения температуры на склонность материала к хрупкому разрушению. Этот порог определяют по результатам ударных испытаний образцов с надрезом при понижающейся температуре. При таких испытаниях для оценки поведения материала при экстремальных условиях эксплуатации важным условием является сочетание ударного нагружения, надреза и низких температур (основных факторов, способствующих охрупчиванию).

О пригодности материала для работы при заданной температуре судят по температурному запасу вязкости, равному разности температуры эксплуатации и t_{50} . При этом, чем ниже температура перехода материала в хрупкое состояние по отношению к рабочей температуре, тем больше температурный запас вязкости материала и выше вероятность хрупкого разрушения.

Долговечность — свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения (постепенного отказа), обеспечивая работоспособность деталей в течение заданного времени (ресурса). Причинами потери работоспособности материала являются: развитие процессов усталости, изнашивания, ползучести, коррозии и др. Эти процессы вызывают постепенное накопление необратимых повреждений в материале и его разрушение. Обеспечение долговечности материала означает уменьшение до требуемых значений скорости его разрушения.

Для большинства деталей машин (более 80 %) долговечность определяется сопротивлением материала усталостным разрушению.

ям (циклической долговечностью) или сопротивлением изнашиванию (износостойкостью).

Циклическая долговечность характеризует работоспособность материала в условиях многократно повторяющихся циклов напряжений. Она тем выше, чем ниже скорости зарождения и развития трещины усталости.

Износостойкость характеризует сопротивление материала разрушению поверхности путем отделения его частиц под воздействием силы трения. Износостойкость оценивают величиной, обратной скорости изнашивания.

Таким образом, работоспособность материала детали в условиях эксплуатации характеризуют следующие критерии конструкционной прочности:

1) критерии прочности σ_b , $\sigma_{0,2}$ и σ_{-1} , которые при заданном запасе прочности определяют допустимые рабочие напряжения, массу и размеры детали;

2) модули упругости E , S , которые при заданной геометрии детали определяют величину упругих деформаций, т.е. ее жесткость;

3) пластичность δ , ψ , ударная вязкость KCT , KCV , KCU , вязкость разрушения K_{Ic} , порог хладноломкости t_{50} , которые оценивают надежность материала в эксплуатации;

4) циклическая долговечность, скорости изнашивания, ползучести, коррозии, определяющие долговечность материала.

2. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Металлические сплавы, обладая уникальным комплексом физико-механических, теплофизических и других свойств, являются основными материалами, используемыми в современном машиностроении. Для них определен примерно следующий допустимый уровень статической прочности: $\sigma_b = 1600 \dots 2200$ МПа (для сталей); $\sigma_b = 1000 \dots 1250$ МПа (для титановых сплавов); $\sigma_b = 550 \dots 600$ МПа (для алюминиевых сплавов).

2.1. СТАЛИ

Детали машин, передающие нагрузку, должны обладать жесткостью и прочностью, которые необходимы для ограничения деформации (упругой и пластической), при гарантированной надежности и долговечности этих деталей. Из всего многообразия металлических материалов в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют стали. Стали обладают высоким, наследуемым от железа, модулем упругости ($E = 210$ ГПа).

Высокую жесткость сталь сочетает с достаточной прочностью (статической и циклической). Их значения можно регулировать в широком диапазоне, изменяя содержание углерода и легирующих элементов и используя технологии термической и химико-термической обработки.

Используя легирование и соответствующую термическую обработку сталей можно изменять их износостойкость, коррозионную стойкость, жаростойкость, жаропрочность, а также особые магнитные, тепловые или упругие свойства. Хорошие технологические свойства сталей (литейные свойства, способность подвергаться сварке, обработке давлением, резанием) позволяют, применяя соответствующие методы обработки, изготавливать детали требуемых размеров и форм. К тому же стали сравнительно недороги.

Благодаря этим достоинствам стали являются основным металлическим материалом промышленности. Разработано около 2000 марок сталей и сплавов на основе железа.

Их свойства определяются количеством углерода и содержанием присутствующих примесей, которые взаимодействуют и с железом, и с углеродом.

Влияние углерода. Механические свойства углеродистой стали зависят, главным образом, от содержания углерода. С ростом содержания углерода в стали увеличивается количество цементита и соответственно уменьшается количество феррита, т. е. повышаются прочность и твердость и уменьшается пластичность. Как видно из графика, приведенного на рисунке 2.1, прочность стали повышается только при содержании в ней углерода до 1 %, а при более высоком содержании углерода прочность уменьшается. Происходит это потому, что образующаяся по границам зерен в эвтектоидных сталях сетка вторичного цементита снижает прочность стали.

Кроме углерода, в стали содержатся и другие элементы (примеси), присутствие которых обусловлено разными причинами. Различают постоянные, скрытые, случайные и специально введенные примеси.

Постоянные примеси — это кремний, марганец, фосфор и сера. Марганец и кремний добавляют в сталь в процессе ее выплавки для раскисления, т. е. для удаления FeO, поэтому их также называют технологическими примесями.

Кроме того, марганец способствует уменьшению содержания сульфида железа FeS в стали: $FeS + Mn \rightarrow MnS + Fe$. Марганец и кремний растворяются в феррите, повышая его прочность; марганец может также растворяться и в цементите. Углеродистые стали обычно содержат до 0,7...0,8 % Mn и до 0,5 % Si.

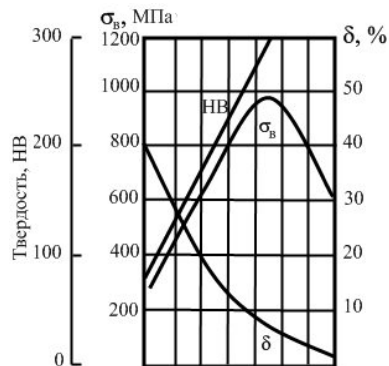


Рис. 2.1. Зависимость свойств горячекатаной углеродистой стали от содержания углерода

Сера попадает в сталь, главным образом, с исходным сырьем (чугуном) и является вредной примесью. Сера нерастворима в железе и образует с ним соединение FeS — сульфид железа. При взаимодействии с железом образуется эвтектика (Fe + FeS) с температурой плавления 988 °С. Поэтому при нагреве стальных заготовок для пластической деформации до температуры выше 900 °С сталь становится хрупкой. При горячей пластической деформации заготовки разрушаются. Это явление называется красноломкостью. Одним из способов уменьшения влияния серы является введение марганца. Образующееся, в виде отдельных включений, тугоплавкое соединение MnS плавится при температуре 1620 °С. Эти включения пластичны и не вызывают явления красноломкости. Содержание серы в сталях допускается не более 0,06 %.

Фосфор попадает в сталь, главным образом, также с исходным чугуном, используемым для выплавки стали. До 1,2 % фосфора растворяется в феррите, уменьшая его пластичность. Фосфор обладает большой склонностью к ликвации, поэтому даже при незначительном среднем количестве фосфора в отливке всегда могут образовываться участки, богатые фосфором. Располагаясь вблизи границ зерен, фосфор повышает температуру перехода материала в хрупкое состояние, т. е. вызывает хладноломкость. Поэтому фосфор, как и сера, является для стали вредной примесью, его содержание в углеродистой стали допускается до 0,05 %. Следует отметить то, что чем больше углерода в стали, тем сильнее влияет фосфор на ее хрупкость.

Содержание серы и фосфора в стали зависит от способа ее выплавки.

Скрытые примеси — это присутствующие в стали газы (азот, кислород, водород). Они называются «скрытыми» из-за сложности определения их количества. Газы попадают в сталь при ее выплавке. В твердой стали они могут присутствовать либо растворяясь в феррите, либо образуя химические соединения (нитриды, оксиды). Газы могут находиться и в свободном состоянии (в несплошностях).

Даже в небольших количествах азот, кислород и водород значительно ухудшают пластические свойства стали. Содержание этих примесей допускается в пределах $10^{-2} \dots 10^{-4}$ %. В результате вакуумирования стали при ее плавке и разливке их содержание значительно уменьшается.

Случайной примесью может быть любой элемент (медь, алюминий, вольфрам, никель), который попал в шихту вместе с металлоломом или чугуном при выплавке стали. Поскольку подобные элементы специально добавляют к стали в качестве легирующих, то содержание случайных примесей не должно превышать соответствующих пределов.

Специальные примеси. Это элементы, специально вводимые в сталь для получения определенных свойств. Такие элементы называют легирующими, а стали, их содержащие, — легированными сталями.

Содержание легирующих элементов в сталях может изменяться в очень широких пределах. Сталь считают легированной хромом или никелем, если содержание этих элементов составляет 1 % или более. При содержании в стали ванадия, молибдена, титана, ниобия и других элементов более 0,1...0,5 % ее считают легированной этими элементами. Сталь является легированной и в том случае, если в ней содержатся только элементы, характерные для углеродистой стали (марганец или кремний), но их количество должно превышать 1 %.

В конструкционных сталях легирование осуществляют для улучшения их механических свойств (прочности, пластичности и т. д.). Кроме того, при введении в сталь легирующих элементов меняются ее физические, химические и другие свойства.

Нужный комплекс свойств достигается не только легированием стали, но и рациональной термической обработкой, в результате которой получается необходимая структура стали.

Как правило, легирующие элементы существенно повышают стоимость стали, а некоторые из них также являются дефицитными металлами. В этой связи добавление в сталь подобных металлов должно иметь соответствующее обоснование.

Существует несколько классификаций, позволяющих систематизировать стали, что упрощает поиск нужной марки стали с учетом ее свойств.

Стали классифицируют по химическому составу, качеству, степени раскисления, структуре и прочности.

По химическому составу стали классифицируют на углеродистые и легированные. В зависимости от концентрации углерода их подразделяют на *низкоуглеродистые* ($< 0,3\%$ С), *среднеуглеродистые* (0,3...0,7 % С) и *высокоуглеродистые* ($> 0,7\%$ С). Легиро-

ванные стали (в зависимости от введенных элементов) подразделяют на *хромистые, марганцовистые, хромоникелевые, марганцевые* и многие другие. По количеству введенных элементов их разделяют на *низко-, средне- и высоколегированные*. В низколегированных сталях содержание легирующих элементов не превышает 5 %, в среднелегированных сталях оно составляет от 5 до 10 %, в высоколегированных — более 10 %.

По их качеству стали классифицируют на стали *обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные*.

Под качеством стали понимают совокупность ее свойств, которые определяют металлургический процесс производства. Однородность химического состава, строения и свойств стали, а также ее технологичность во многом зависят от содержания газов (кислорода, водорода, азота) и вредных примесей — серы и фосфора. Газы являются скрытыми, количественно трудно определяемыми примесями, поэтому нормы содержания вредных примесей служат основными показателями для разделения сталей по качеству. Стали обыкновенного качества содержат до 0,050 % S и 0,040 % P, качественные — не более 0,04 % S и 0,035 % P, высококачественные — не более 0,025 % S и 0,025 % P, особовысококачественные — не более 0,015 % S и 0,025 % P.

Стали (в зависимости от степени раскисления при выплавке) могут быть спокойными (сп), полуспокойными (пс) или кипящими (кп), что и указывают в марке стали. Спокойные, полуспокойные и кипящие стали при одинаковом содержании углерода имеют практически одинаковую прочность. Главное их различие заключается в пластичности, которая обусловлена содержанием кремния. Содержание кремния в спокойной стали составляет 0,15...0,35 %, в полуспокойной — 0,05...0,15 %, в кипящей — менее 0,05 %. Следует отметить, что в мартеновских или электрических печах выплавляют только спокойные легированные стали.

В результате уменьшения содержания кремния в феррите кипящих сталей они становятся мягкими. В этой связи кипящая сталь хорошо штампуются в холодном состоянии (например, для изготовления деталей глубокой вытяжкой). Но из-за большого содержания газов (особенно азота) кипящие стали склонны к деформационному старению. Кроме того, большое содержание кислорода в такой ста-

ли повышает порог ее хладноломкости. Следует отметить, что кипящие стали становятся хрупкими уже при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как спокойные стали, содержащие одинаковое количество углерода, могут «работать» при температурах до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такие стали более склонны к зональной ликвации. Они являются наиболее дешевыми сталями, но их качество низкое и поэтому эти стали используют для изготовления неотчетливых деталей.

По структуре в отожженном состоянии стали делят на *доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные*. Легированные стали, кроме того, могут быть ферритного, аустенитного и ледебуритного классов. К ферритному классу относятся стали, в которых при малом содержании углерода имеется большое количество ферритообразующих легирующих элементов, например, хрома. К ледебуритному классу относятся стали с большим содержанием углерода и карбидообразующих элементов, в результате чего в их структуре имеются первичные карбиды — легированный ледебурит.

По структуре после охлаждения на воздухе легированные стали разделяют на три основных класса: перлитный, мартенситный и аустенитный. Следует отметить, что легирующие элементы увеличивают устойчивость аустенита в перлитной области и понижают температуру мартенситного превращения. Поэтому при одинаковой скорости охлаждения сталей до комнатных температур при разном содержании легирующих элементов и углерода получаются различные структуры.

По назначению стали подразделяют на конструкционные и инструментальные.

По прочности, оцениваемой временным сопротивлением, конструкционные стали с некоторой условностью можно разделить на стали *нормальной (средней) прочности* ($\sigma_b < 1000\text{ МПа}$), *повышенной прочности* ($\sigma_b < 1500\text{ МПа}$) и *высокопрочные* ($\sigma_b > 1500\text{ МПа}$).

2.1.1. Конструкционные стали

Общими потребительскими требованиями к конструкционным сталям являются наличие у них определенного комплекса механических свойств, обеспечивающего длительную и надежную работу материала в условиях эксплуатации, и хороших технологических

свойств (обрабатываемости давлением, резанием, закаливается, свариваемости и др.). Конструкционные стали разделяют на строительные (арматурные) и машиностроительные, а последние, в свою очередь, подразделяются на группы общего и специального назначения. Классификация конструкционных сталей представлена на рисунке 2.2.



Рис. 2.2. Классификация конструкционных сталей

Конструкционные машиностроительные стали общего назначения

Основным требованием к конструкционным машиностроительным сталям общего назначения является наличие у них определенного комплекса механических свойств с заданным распределением их по сечению изделия. Комплекс механических свойств (если не предъявляются какие-либо специальные требования) включает характеристики прочности, пластичности, удельной работы деформации и разрушения (ударной вязкости).

Стали этой группы по химическому составу делятся на низко- и среднеуглеродистые (ГОСТ 1050–88, ГОСТ 380–2005), низко- и сред-

нелегированные (ГОСТ 4543–71), а по способу упрочнения — без термической обработки, упрочняемые в поверхностном слое (цементуемые) и по всему объему (улучшаемые).

Стали 08кп, 10кп, 15кп, 08, Ст3, используемые **без термической обработки**, поставляются, главным образом, в листах. Они должны иметь пониженное содержание углерода и кремния, что обеспечивает хорошую деформируемость в холодном состоянии. Для холодной штамповки изделий из листовой стали в машиностроении используются стали 09Г2С, 09Г2, 16ГФР, 12ХМ и др.

К сталям, **упрочняемым в поверхностном слое (цементуемым)**, относятся нитроцементуемые, цементуемые, азотируемые, а также закаливаемые и с пониженной прокаливаемостью. Цементуемые стали этой группы содержат 0,1...0,3 % углерода и 0,2...4,4 % легирующих элементов. После насыщения углеродом, закалки и низкого отпуска изделия из таких сталей имеют высокую поверхностную твердость (58...63 HRC) и вязкую сердцевину.

По механическим свойствам после термообработки цементуемые стали подразделяют на среднечные ($\sigma_T \leq 700$ МПа) и стали повышенной прочности ($\sigma_T > 700$ МПа).

Эксплуатационные свойства изделий из низко- и среднелегированных цементуемых сталей определяются сочетанием свойств поверхностного слоя и сердцевины. Прочностные свойства слоя на рабочей поверхности изделий обусловлены, главным образом, содержанием в нем углерода. Легирующие элементы оказывают влияние на свойства поверхностного слоя (карбидообразующие добавки увеличивают степень науглероживания, а никель и кремний ее снижают).

Работоспособность деталей из цементуемых легированных сталей повышается при увеличении предела текучести и твердости их срединной части. Степень упрочнения сердцевины деталей из стали повышается с увеличением содержания в ней углерода и легирующих элементов.

В качестве **цементуемых углеродистых** сталей используются качественные стали марок 15 и 20. **Легированные цементуемые** стали (12ХН3А, 12Х2Н4А, 15Х, 15ХА, 15ХФ, 15ХР, 18Х2Н4В, 20Х, 20ХН, 20ХГР, 18ХГТ, 20ХГНР и др.) применяют для изготовления деталей, более сильно нагруженных, а также изделий

более крупных размеров и сложной формы (валов, осей, шестерен и др.). В таблице 2.1 представлено назначение цементуемых сталей.

Таблица 2.1

Области применения цементуемых и улучшаемых сталей

Марка стали	Назначение стали
10, 15, 20	Детали небольших размеров неответственного назначения
15Х, 20Х	Детали небольшого сечения и несложной формы, работающие при повышенных удельных нагрузках
15ХА	Небольшие детали, работающие в условиях трения при средних давлениях и скоростях
20ХН, 12ХН3А	Детали средних размеров, испытывающие при работе высокие удельные нагрузки
18ХГС, 25ХГМ	Ответственные детали, работающие при больших скоростях, высоких давлениях и ударных нагрузках
20ХН, 20Х2Н4А	Крупные ответственные тяжело нагруженные детали
18Х2Н4МА	Крупные особо ответственные тяжело нагруженные детали, работающие при больших скоростях с наличием вибрационных и динамических нагрузок

К сталям, **упрочняемым по всему объему (улучшаемым)**, относятся стали, содержащие $\approx 0,35$ % С (углеродистые и малолегированные) и 0,3...0,5 % С (средне- и высоколегированные). Улучшаемые легированные стали характеризуются содержанием углерода и легирующих элементов не более 5 %. Такие стали используются преимущественно после термической операции — **улучшения** (закалки и высокого отпуска при температуре 500...650 °С на сорбит).

Основное назначение этих сталей — изготовление ответственных деталей машин, эксплуатируемых при воздействии цик-

лических или ударных нагрузок. Поэтому эти стали должны иметь высокий предел текучести, низкую чувствительность к концентрации напряжений, достаточную вязкость и пластичность. Важными характеристиками таких сталей являются порог хладноломкости и предел выносливости.

Области применения улучшаемых сталей и их марки представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Области применения улучшаемых конструкционных сталей

Марка стали	Назначение стали
30, 35, 40, 45, 50, 55	Оси, валы, штоки, шестерни, шпиндели (с увеличением содержания углерода прочность повышается)
35Г2, 35Х, 40Х, 45Х	Оси, валы, шестерни, коленчатые и распределительные валы, пальцы, штоки, шатуны
40ХС, 40ХФА, 25ХГСА	То же, но для более сильно нагруженных деталей
30ХГТ	Оси, валы, рычаги, толкатели
30ХГС, 35ХГСА, 40ХН2МА	Оси, валы, лопатки компрессорных машин, рычаги, толкатели. Клапаны, шатуны, шестерни высокой прочности
30ХН3А, 30ХН2МФА, 38ХН3МФА	Коленчатые валы, шатуны, шпиндели, роторы и диски турбин и другие детали ответственного назначения

Конструкционные машиностроительные стали специального назначения

Специальное назначение этих сталей и сплавов определяется требованиями к конкретному комплексу их механических, физических, физико-химических и технологических свойств. Этот комплекс свойств необходим для эксплуатации изделий в определенных условиях (например, при очень высоких напряжениях, низких или повышенных температурах, динамических или гидроабразивных нагрузках, а также для деталей специального назначения в приборах и аппаратах электро- и радиотехнической промышленности).

По основному потребительскому свойству конструкционные машиностроительные стали специального назначения делятся на следующие группы: особо высокой прочности и вязкости (мартенситно-старееющие), коррозионно-стойкие, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие, пружинные, автоматные, шарикоподшипниковые и литейные.

Стали особо высокой прочности и вязкости (мартенситно-старееющие) по химическому составу являются безуглеродистыми (менее 0,03 % С) и высоколегированными (Ni, Co, Mo, Cr, Ti, Вe и др.). К ним относятся стали следующих марок: Н18К9М5, Н10Х11М2Т, Н10Х12Д2Т, Н12К15М10, Н18К9М5Т, Н18К8М3, Н18К12М5Т, Н4Х12К15М4Т. В закаленном состоянии эти стали сравнительно легко обрабатываются давлением, резанием и хорошо свариваются. Выпускаются коррозионно-стойкие и теплостойкие мартенситно-старееющие стали. Так, при дополнительном легировании хромом ($\approx 12\%$) эти стали становятся стойкими против коррозии даже в очень агрессивных средах (морской воде, кислотах и др.).

Мартенситно-старееющие стали из-за их высокой стоимости применяются для изготовления деталей наиболее ответственного назначения. Так, сталь Н18К9М5 применяется для производства шестерен, валов, корпусов ракет; Н10Х11М2Т — гидрокрыльев, корпусов подводных лодок, батискафов; Н10Х12Д2Т — деталей химической аппаратуры, пружин; Н4Х12К15М4Т — штампов горячего деформирования, деталей теплоэнергетических установок и др.

Коррозионно-стойкие стали и сплавы (нержавеющие) (ГОСТ 5632–72) используют для производства изделий, работающих в коррозионных средах. Такие материалы обязательно содержат в своем составе более 12,5 % Cr, роль которого состоит в образовании на поверхности изделия защитной (пассивной) оксидной пленки, прерывающей контакт с агрессивной средой.

Назначение некоторых коррозионно-стойких сталей и сплавов отражено в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Назначение коррозионно-стойких сталей

Марки сталей и сплавов	Назначение
20X13, 08X13, 12X13, 25X13H2	Детали с повышенной пластичностью, подвергающиеся ударным нагрузкам (клапаны гидравлических прессов, предметы домашнего обихода), а также изделия, подвергающиеся действию слабоагрессивных сред (атмосферные осадки, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре и др.)
30X13, 40X13	Режущий, мерительный и хирургический инструмент, пружины, карбюраторные иглы, предметы домашнего обихода, клапанные пластины компрессоров
95X18	Шарикоподшипники высокой твердости для нефтяного оборудования, ножи высшего качества, втулки и другие детали, подвергающиеся сильному износу
15X25T, 15X28	Рекомендуются в качестве заменителя стали марки 12X18H10T для сварных конструкций, не подвергающихся действию ударных нагрузок при температуре эксплуатации не ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, для работы в более агрессивных средах по сравнению со средами, для которых рекомендуется сталь марки 08X17T
08X10H20T2	Рекомендуется как немагнитная сталь для производства крупногабаритных деталей, работающих в морской воде
12X18H9, 08X18H10, 17X18H9, 12X18H12T	Применяются в виде холоднокатаного листа и ленты повышенной прочности для различных деталей и конструкций, свариваемых точечной сваркой, а также для изделий, подвергаемых термической обработке (закалке)
H70MФВ	Применяется для изготовления сварных конструкций, работающих при высоких температурах в кислоте (соляной, серной, фосфорной), а также в других средах восстановительного характера
XH65MBV	Применяется для изготовления сварных конструкций, работающих при повышенных температурах в агрессивных средах окислительно-восстановительного характера (серная, уксусная кислоты, влажный хлор, хлориды и т. д.)
65X13	Предназначается для изготовления лезвий безопасных бритв и кухонных ножей

Жаростойкие (окалиностойкие) стали и сплавы (ГОСТ 5632–72) обладают стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ и работают в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Эти материалы получают на базе системы Fe + Cr + Ni с небольшим количеством кремния. Назначение некоторых жаростойких сталей и сплавов отражено в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Назначение жаростойких сталей

Марки сталей и сплавов	$t_{\text{раб}}^*$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{окал}}^{**}$, $^{\circ}\text{C}$	Назначение
1	2	3	4
40X9C2	–	850	Выпускные клапаны автомобильных и тракторных моторов, дизелей, трубы рекуператоров, теплообменники, колосники
30X13H7C2	–	950	Клапаны автомобильных моторов
12X13	–	700	Детали турбин, трубы, детали котлов
10X13CЮ	–	950	Клапаны автомобильных и тракторных моторов, различные детали
12X17	–	900	Теплообменники, трубы, оборудование кухонь и т. п.
08X18T1	–	900	Теплообменники, трубы, оборудование кухонь и т. п.
15X25T	–	1050	Аппаратура, детали, чехлы термопар, электроды искровых зажигательных свечей, трубы пиролизных установок, теплообменники
15X28	–	1100... 1150	Аппаратура, детали, трубы пиролизных установок, теплообменники

Окончание табл. 2.4

1	2	3	4
20X20H14C2	–	1000... 1050	Печные конвейеры, ящики для цементации
08X18H10, 12X18H9	800	850	Трубы, детали печной арматуры, теплообменники, муфелы, ретор- ты, патрубки и коллекторы вы- хлопных систем, электроды ис- кровых зажигательных свечей
36X18H25C2	1000	1100	Печные конвейеры и другие нагруженные детали
10X23H18, 20X23H18	1000	1050	Трубы и детали установок для конверсии метана, пиролиза, ли- стовые детали
45X22H4M3	–	950	Клапаны автомобильных моторов
20X25H20C2	1050	1100	Подвески и опоры в котлах, тру- бы электролизных и пиролизных установок
ХН45Ю	1250... 1300	–	Детали горелочных устройств, чехлы термопар, листовые и трубчатые детали печей (произ- водство вспученного перлита, обжиг керамической плитки)
ХН78Т	1100	1150	Детали газопроводных систем, сортовые детали, трубы
ХН60ВТ	1000	1100	Листовые детали двигателя
ХН70Ю	1200	Более 1250	Детали газопроводных систем
Примечания: $t_{\text{раб}}^*$ — рекомендуемая максимальная температура применения в течение длительного времени (до 10000 ч); $t_{\text{окал}}^{**}$ — температура начала интенсивного окисления в воздушной среде			

Жаропрочные стали и сплавы. Это стали и сплавы, способные работать в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной прочностью.

Жаропрочные стали и сплавы в своем составе обязательно содержат никель, который обеспечивает существенное увеличение предела длительной коррозионной прочности при незначительном

увеличении предела текучести и временного сопротивления, и марганец. Эти сплавы и стали могут дополнительно легироваться молибденом, вольфрамом, ниобием, титаном, бором, йодом и др. Так, микролегирование бором, а также редкоземельными и некоторыми щелочно-земельными металлами повышает такие характеристики этих материалов, как число оборотов при кручении, пластичность и вязкость при высоких температурах. В таблице 2.5 представлено назначение некоторых жаропрочных сталей.

Таблица 2.5

Назначение жаропрочных сталей

Марки сталей и сплавов	$t_{\text{раб}}^*$, °С	$t_{\text{окал}}^{**}$, °С	Срок службы***	Назначение
1	2	3	4	5
40X10C2M	650	850	Длительный	Клапаны моторов, крепежные детали
11X11H2B2MФ, 13X11H2B2MФ	600	750	Длительный	Диски компрессоров, лопатки и другие нагруженные детали
20X13	500	750	Весьма длительный	Лопатки паровых турбин, клапаны, болты и трубы
13X14H3B2ФР	550	750	Весьма длительный	Высоконагруженные детали, в том числе диски, валы, стяжные болты, лопатки и другие детали, работающие в условиях повышенной влажности
45X22H4M3	850	950	Длительный	Клапаны моторов
08X13	650	750	Ограниченный	Лопатки паровых турбин, клапаны, болты и трубы
10X11H23Т3МР	700	850	Ограниченный	Пружины и детали крепежа
18X11МНФБ, 20X12ВНМФ	600	750	Очень длительный	Высоконагруженные детали, лопатки паровых турбин, детали клапанов, поковки дисков, роторов паровых и газовых турбин
45X14H14B2M	650	850	Длительный	Клапаны моторов, поковки, детали трубопроводов

Окончание табл. 2.5

1	2	3	4	5
08X16H13M2Б	600	850	Весьма длительный	Поковки для дисков и роторов, лопатки, болты
09X16H15M3Б	350	850	Весьма длительный	Грубы пароперегревателей и трубопроводов высокого давления
12X18H10Т, 12X18H12Т, 12X18H9Т	600	850	Весьма длительный	Детали выхлопных систем, трубы, листовые и сортовые детали
20X23H18	1000	1050	Длительный	Детали установок в химической и нефтяной промышленности, газопроводы, камеры сгорания (может применяться для нагревательных элементов сопротивления)
XH70BMТЮ	850	1000	Длительный	Лопатки турбин
XH80ТБЮ	700	1050	Весьма длительный	Лопатки, крепежные детали турбин
XH78Т	1000	1100	Ограниченный	Жаровые трубы
XH67MBТЮ	800... 850	1000... 1100	Длительный	Лопатки, корпуса, диски, листовые детали турбин
XH55MBЮ	900	1080	Кратковременный	Лопатки, диски турбин
XH65BMТЮ	800	1000	Весьма длительный	Рабочие и направляющие лопатки, крепежные детали газовых турбин
XH56BMТЮ	800	1050	Ограниченный	Высоконагруженные детали, штуцера, фланцы, листовые детали
XH70BMТЮФ	850	1050	Длительный	Лопатки турбин

Примечания: $t_{\text{раб}}^*$ — рекомендуемая температура применения;
 $t_{\text{окал}}^{**}$ — температура начала интенсивного окалинообразования в воздушной среде.
 $***$ Под кратковременным сроком работы условно понимают время службы детали до 100 ч, под ограниченным сроком — от 100 до 1000 ч, под длительным сроком работы — от 1000 до 10 000 ч (в отдельных случаях до 20 000 ч), под весьма длительным сроком работы — значительно больше 10 000 ч (обычно от 50 000 до 100 000 ч)

Рессорно-пружинные стали (ГОСТ 14959—79) должны обладать высокими механическими свойствами, в первую очередь, высокими пределами упругости и прочности, а также повышенной релаксационной стойкостью при достаточной вязкости и пластичности. Эти стали содержат более 0,5 % С, а необходимые свойства приобретают после термической обработки (заковки и отпуска) или деформационного упрочнения после патентирования (специальная термическая обработка, в результате которой получают структуру тонкопластинчатого троостита или сорбита). Рессорно-пружинные стали (65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 65Г, 70Г, 55С2, 55С2А, 60С2, 60С2А, 70С3А, 60С2Г, 50ХГ, 50ХГА, 55ХГР, 50ХФА, 51ХФА, 50ХГФА, 55С2ГФ, 60С2ХА, 60С2ХФА, 60С2ВА, 60С2Н2А 70С2ХА), в основном, используются для изготовления пружин, рессор, торсионов, проволоки и т. п.

Кроме рессорно-пружинных сталей общего назначения в машиностроении широко применяются *рессорно-пружинные стали специального назначения*, к которым помимо требования высоких механических свойств могут предъявляться дополнительные требования по физико-химическим свойствам: немагнитности, коррозионной стойкости, низкому или постоянному температурному коэффициенту модуля упругости и проч.

Области применения рессорно-пружинных сталей представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6

Области применения рессорно-пружинных сталей

Марка стали	Применение
60С2, 60С2А	Для рессор из полосовой стали толщиной 3...16 мм и пружинной ленты толщиной 0,08...3 мм; для витых пружин из проволоки диаметром 3...16 мм. Обрабатываются резанием плохо. Максимальная температура эксплуатации составляет 250 °С
70С3А	Для тяжело нагруженных пружин ответственного назначения
50ХГ, 50ХГА	Для рессор из полосовой стали толщиной 3...18 мм. Обрабатывается резанием плохо

Марка стали	Применение
50ХФА, 50ХГФА	Для ответственных пружин и рессор, работающих при повышенной температуре (до 300 °С); для пружин, подвергаемых многократным переменным нагрузкам
60С2ХА	Для крупных высоконагруженных пружин и рессор ответственного назначения
60С2Н2А, 65С2ВА	Для ответственных высоконагруженных пружин и рессор, изготавливаемых из калиброванной стали и пружинной ленты

Автоматные стали. Сталь конструкционная повышенной и высокой обрабатываемости резанием (ГОСТ 1414—75) содержит 0,08...0,45 % углерода, 0,05...0,3 % серы (повышенное содержание), 0,05...0,16 % фосфора и, как правило, 0,6...1,55 % марганца, которые облегчают резание, способствуют дроблению и легкому отделению стружки, обеспечивая чистоту обрабатываемой поверхности. Автоматные стали получили свое название в связи с их обработкой на станках-автоматах с повышенной скоростью резания. Срок службы режущего инструмента при обработке автоматных сталей увеличивается. Улучшение обрабатываемости стали достигается также микролегированием (свинцом, селеном, кальцием). Однако введение этих элементов снижает прочностные характеристики сталей (им свойственна значительная анизотропия ударной вязкости). Поэтому их применяют для изготовления деталей малоответственного назначения, от которых не требуется высоких механических свойств (шайб, болтов, гаек, шпилек и некоторых других деталей, применяемых в автомобилестроении).

В обозначении марки первая буква «А» указывает, что сталь автоматная; а цифры, следующие за буквой, показывают содержание в стали углерода в сотых долях процента (например, А11). Присутствие свинца обозначается буквой «С» (например, АС35Г2), кальция — буквой «Ц» (АЦ40), селена — буквой «Е» (А35Е).

Подшипниковые стали (ГОСТ 801—78 и ГОСТ 21022—75) используются для изготовления деталей шариковых и роликовых подшипников. Эти материалы предназначены для подшипников ка-

чения. Усталостное выкрашивание материала на их рабочих поверхностях вызывают циклические контактные напряжения сжатия. Кроме того, происходит износ контактных поверхностей результате их проскальзывания. Поэтому рабочие поверхности подшипников должны иметь высокую твердость.

Подшипниковые стали разделяют на стали общего применения (подшипники работают в неагрессивных средах при температуре 60...300 °С) и стали специального назначения (теплостойкие, коррозионно-стойкие и др.).

Подшипники качения изготавливают из высокоуглеродистых сталей после сквозной закалки и низкого отпуска. Для изготовления шариков, роликов и колец подшипников применяют недорогие технологичные хромистые стали ШХ4, ШХ15, ШХ15ГС и ШХ20ГС, содержащие примерно 1 % углерода (ГОСТ 801—78). В обозначении марок буква «Ш» означает шарикоподшипниковую сталь; «Х» — наличие хрома; цифра — его массовую долю в десятых долях процента (0,4; 1,5; 2,0); СГ — легирование кремнием (до 0,85 %) и марганцем (до 1,7 %). В конце марок подшипниковых сталей может быть указан способ их производства: Ш — сталь, полученная методом электрошлакового переплава (ШХ15Ш), В — сталь, полученная вакуумированием (ШХ15В).

Детали подшипников подвергают типичной для заэвтектоидных сталей термической обработке: неполной закалке при температуре 820...850 °С и низкому отпуску при температуре 150...170 °С. После закалки в структуре сталей сохраняется остаточный аустенит (8...15 %), превращение которого может вызывать изменение размеров деталей подшипников. Для стабилизации этих размеров прецизионные подшипники обрабатывают холодом при температуре –70...–80 °С. Окончательно обработанная подшипниковая сталь имеет структуру мартенсита с включениями мелких карбидов и обладает высокой твердостью ($HRC\ 60...64$).

Для изготовления высокоскоростных подшипников применяют стали, полученные электрошлаковым переплавом (к марке таких сталей добавляют букву «Ш», например, ШХ15-Ш), отличающиеся наиболее высокой однородностью структуры. Такие стали необходимы также для изготовления высокоточных приборных подшипников, детали которых тщательно полируются для того, чтобы обеспечить минимальный коэффициент трения.

Сталь ШХ4 характеризуется ограниченной прокаливаемостью и предназначена для изготовления роликовых подшипников, применяемых в железнодорожном транспорте. При закалке эту сталь подвергают сквозному индукционному нагреву и охлаждению водой. Кольца из этой стали толщиной 14 мм закаливаются только с поверхности (в слое 2...3 мм) и благодаря сохранению вязкой сердцевины могут работать при динамической нагрузке.

Детали крупногабаритных роликовых подшипников диаметром 0,5...2 м (для прокатных станков, электрических генераторов) изготавливают из сталей 12ХН3А, 12Х2Н4А, подвергая их цементации на большую глубину (3...6 мм).

Для подшипников, работающих в агрессивных средах, применяют коррозионно-стойкую хромистую сталь 95Х18 (0,95 % С, 18 % Cr).

Сталь ШХ15, кроме изготовления деталей подшипников, применяется также для производства игл распылителей форсунок, обратных клапанов и подушек впрыскивающих систем, валиков топливных насосов, роликов, осей рычагов и других деталей, от которых требуется высокая твердость и хорошее сопротивление износу.

Литейные стали (ГОСТ 977—88) содержат до 0,9 % Mn, до 0,52 % Si и не более 0,06 % S и 0,08 % P. Литейные свойства таких сталей значительно хуже, чем чугунов и большинства литейных цветных сплавов.

Многие литейные стали имеют те же марки, что и деформируемые, отличаясь лишь буквой «Л» в конце марки (15Л, 20Л, 25Л, 30Л, 35Л, 40Л, 45Л, 50Л, 35ХМЛ, 35ХГСЛ, 12Х18Н9ТЛ и др.). При этом химический состав литейной стали практически такой же, как деформируемой, а отличается лишь допустимым количеством вредных примесей (в литейной стали оно несколько больше). Однако немало легированных сталей разработано специально в качестве литейных, которые не имеют аналогов среди деформируемых. Например, сталь 20ФЛ, применяемая для отливки крупногабаритных деталей грузовых вагонов, а также сталь 08ГДНФЛ, используемая для изготовления крупных деталей ответственного назначения, применяемых в судостроении и работающих при температуре до 60 °С.

Для изготовления отливок согласно ГОСТ 977—88 применяются следующие марки сталей:

1) конструкционные нелегированные — 15Л, 20Л, 25Л, 30Л, 35Л, 40Л, 45Л, 50Л;

2) конструкционные легированные — 20ГЛ, 35ГЛ, 20ГСЛ, 30ГСЛ, 20Г1ФЛ, 20ФЛ, 30ХГСФЛ, 45ФЛ, 32Х06Л, 40ХЛ, 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 20ГНМФЛ, 35ХМЛ, 30ХНМЛ, 35ХГСЛ, 35НГМЛ, 20ДХЛ, 08ГДНФЛ, 13ХНДФЛ, 12ДН2ФЛ, 12ДХН1МФЛ, 23ХГС2МФЛ, 12Х7Г3СЛ,

25Х2ГНМФЛ, 27Х5ГСМЛ, 30Х3С3ГМЛ, 03Н12Х5М3ТЛ, 03Н12Х5М3ТЮЛ;

3) легированные специального назначения: коррозионно-стойкие — 20Х13Л, 08Х14НДЛ, 09Х16Н4БЛ, 09Х17Н3СЛ, 10Х12НДЛ, 15Х13Л, 15Х25ТЛ, 08Х15Н4ДМЛ, 08Х14Н7МЛ, 14Х18Н4Г4Л, 12Х25Н5ТМФЛ, 16Х18Н12С4ТЮЛ, 10Х18Н3Г3Д2Л, 10Х18Н9Л, 12Х18Н9ТЛ, 10Х18Н11БЛ, 07Х17Н16ТЛ, 12Х18Н12М3ТЛ; жаростойкие — 20Х5МЛ, 20Х8ВЛ, 40Х9С2Л35Х23Н7СЛ, 40Х24Н12СЛ, 20Х20Н14С2Л, 55Х18Г14С2ТЛ, 15Х23Н18Л, 20Х25Н19С2Л, 18Х25Н19СЛ, 45Х17Г13Н3ЮЛ; жаропрочные — 20Х12ВНМФЛ, 35Х18Н24С2Л, 31Х19Н9МВБТЛ, 12Х18Н12БЛ, 08Х17Н34В5Т3Ю2РЛ, 15Х18Н22В6М2РЛ, 20Х21Н46В8РЛ; износостойкие — 110Г13Л, 110Г13Х2БРЛ, 110Г13ФТЛ, 130Г14ХМФАЛ, 120Г10ФЛ; быстрорежущие — 85Х4М5Ф2В6Л (Р6М5Л), 90Х4М4Ф2В6Л (Р6М4Ф2Л).

Назначение отливок из некоторых конструкционных нелегированных сталей приведено в таблице 2.7.

Таблица 2.7

Назначение и общая характеристика отливок из конструкционных нелегированных сталей

Марка стали	Назначение
1	2
15Л	Детали, подвергающиеся ударным нагрузкам (копровые бабы, захваты, блоки, ролики и прочие) и резким изменениям температуры, а также детали сварно-литых конструкций с большим объемом сварки
20Л	Арматура и детали трубопроводов, фасонные отливки, изготавливаемые методом выплавляемых моделей, детали сварно-литых конструкций, детали ответственного назначения автосцепки (корпуса, тяговые хомуты, замковые упорные плиты)
25Л	Станины прокатных станков, шкивы, траверсы, поршни, корпуса подшипников, зубчатые колеса, арматура паровых турбин, оси, валы и другие детали, работающие под действием средних статических и динамических нагрузок при температуре от –40 до +450 °С
30Л	Корпуса редукторов, муфты, шкивы, кронштейны, станины, балки, бандажи, маховики и другие детали, работающие под действием средних статических и динамических нагрузок
35Л	Задвижки, вилки, кронштейны и другие детали, работающие под действием средних статических и динамических нагрузок

Окончание табл. 2.7

1	2
40Л, 45Л	Станины, корпуса, муфты, тормозные диски, зубчатые колеса, кожухи, вилки, звездочки, детали лебедки, храповики и другие детали ответственного назначения, к которым предъявляют требования повышенной прочности и высокого сопротивления износу. Детали, работающие под давлением при температуре от –30 до +450 °С
50Л, 55Л	Зубчатые колеса, бегунки, зубчатые венцы, зубчатые муфты, ходовые колеса

Области применения некоторых литейных сталей приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Области применения конструкционных легированных сталей

Марка стали	Области применения
1	2
20ГЛ	Диски, звездочки, зубчатые венцы, барабаны и другие детали, к которым предъявляются требования по прочности и вязкости, и работающие под действием статических и динамических нагрузок
35ГЛ	Диски, звездочки, зубчатые венцы, барабаны, шкивы и другие тяжело нагруженные детали экскаваторов, крышки подшипников, цапфы
30ГСЛ	Зубчатые колеса, ролики, обоймы, зубчатые венцы, рычаги, фланцы, шкивы, сектора, колонны, ходовые колеса и другие детали
30ХГСФЛ	Литые детали экскаваторов
45ФЛ	Износостойкие литые детали для тракторов и металлургического оборудования
40ХЛ	Детали повышенной прочности, а также работающие на износ
20ХМЛ	Шестерни, крестовины, втулки, зубчатые колеса, цилиндры, обоймы и другие корпусные детали, работающие при температуре до 500 °С
20ХМФЛ	Детали арматуры, корпусные детали, цилиндры, работающие при температуре до 540 °С

Окончание табл. 2.8

1	2
35ХМЛ	Шестерни, крестовины, втулки, зубчатые колеса, печные детали и другие детали ответственного назначения, к которым предъявляются требования высокой прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок
30ХНМЛ	Нагруженные детали ответственного назначения, к которым предъявляются требования высокой прочности и достаточной вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок при температуре до 400 °С
35ХГСЛ	Зубчатые колеса, звездочки, оси, валы, муфты и другие детали ответственного назначения, от которых требуется повышенная износостойкость
35НГМЛ, 20ДХЛ	Ответственные нагруженные детали, к которым предъявляются требования высокой прочности и достаточной вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок
12Х7Г3СЛ	Ответственные высоконагруженные детали со стенкой толщиной до 100 мм, работающие в условиях статических и динамических нагрузок

Область применения легированной стали со специальными свойствами приведена в таблице 2.9.

Таблица 2.9

Область применения легированной стали со специальными свойствами

Марка стали	Область применения
1	2
20Х13Л	Детали, подвергающиеся ударным нагрузкам (клапаны гидравлических прессов, сегменты сопел и прочие)
40Х9С2Л	Детали, работающие длительное время под нагрузкой при температуре до 700 °С (клапаны моторов, колошники, крепежные детали)
08Х14Н7МЛ	Детали изделий, работающих при комнатных и низких (до – 196 °С) температурах

1	2
14X18H4Г4Л	Коллекторы выхлопных систем, детали печной арматуры и прочие
10X18H19Л	Коллекторы выхлопных систем, детали печной арматуры и другие детали, работающие при температуре до 400 °С
35X18H24C2Л	Детали, работающие при высоких температурах в сильнонагруженном состоянии (печные конвейеры, шнеки, крепежные детали)
110Г13Л, 110Г13ФТЛ	Гусеничные траки, звездочки, зубья ковшей экскаваторов, щеки дробилок и другие детали, работающие на ударный износ
120Г10ФЛ	Звенья гусениц тракторов и другие детали, работающие в условиях абразивного износа

2.1.2. Инструментальные стали

Инструментальные стали (ГОСТ 1435—99, ГОСТ 5950—2000, ГОСТ 19265—73) составляют наиболее обширную и важную группу инструментальных материалов. Они предназначены для изготовления режущих и мерительных инструментов, а также штампов холодного и горячего деформирования.

Характерным условием для эксплуатации инструментов (особенно режущих и штампов) являются высокие контактные давления на рабочую кромку, вызывающие ее разогрев и изнашивание. В связи с этим важнейшим условием работоспособности инструментов является высокая износостойкость материала, которая, в первую очередь, обусловлена его высокой твердостью. Высокую твердость материал должен сохранять при повышенных температурах, т. е. обладать теплостойкостью. Для сталей теплостойкость определяется сопротивлением разупрочнению при отпуске. Она оценивается наибольшей температурой нагрева материала, до которой сохраняется его мартенситная структура и свойственные ей высокие твердость и износостойкость. Работе многих инструментов сопутствуют также высокие статические напряжения (чаще всего изгиба или кручения). Для того, чтобы исключить поломку инстру-

мента от этих напряжений его материал должен обладать высокой прочностью. Для штампов, фрез и других инструментов характерно ударное нагружение. Следует отметить, что при этом особое значение имеет вязкость материала. Необходимый уровень каждого из основных свойств (износостойкость, теплостойкость, прочность и вязкость) для инструментов различных типов различен. При этом требуемое сочетание максимальных значений отдельных свойств (например, высокой твердости и вязкости) во многих случаях трудно обеспечить. Предпочтение отдается одному или нескольким основным свойствам, которые в наибольшей степени способствуют работоспособности инструментов данного типа. Многообразие размеров и форм инструментов придает большое значение их технологическим свойствам: прокаливаемости, малым объемным изменениям при закалке, хорошей обрабатываемости давлением, резанием и др. Инструмент изготавливают из углеродистых и легированных сталей.

Углеродистые стали (ГОСТ 1435–99) производят качественными (У7, У8, У9, ..., У13) и высококачественными (У7А, У8А, У9А, ..., У13А). Буква «У» в марке стали показывает, что сталь углеродистая, а цифра – среднее содержание углерода в десятых долях процента. Углеродистые стали поставляют после отжига на зернистый перлит. Благодаря невысокой твердости в состоянии поставки (*НВ* 1870...2170) углеродистые стали хорошо обрабатываются резанием и деформируются, что позволяет применять накатку, насечку и другие высокопроизводительные методы изготовления инструментов.

Из-за низкой прокаливаемости углеродистые стали пригодны для изготовления мелких инструментов или инструментов с поперечным сечением до 25 мм с незакаленной сердцевиной. Несквозная закалка уменьшает деформацию инструментов и повышает благодаря вязкой сердцевине их устойчивость к ударам и вибрациям. Инструмент с поперечным сечением 15...25 мм охлаждают в воде или водных растворах солей и щелочей. Инструменты с незакаленной сердцевиной меньшего сечения для уменьшения деформаций и опасности растрескивания охлаждают в масле или расплавах солей при температуре 160...200 °С.

Режущие инструменты (мелкие метчики, сверла, напильники, пилы, шаберы и прочие) изготавливают из заэвтектоидных сталей У10, УН, У12 и У13. Их подвергают неполной закалке и низкому

отпуску при температуре 150...180 °С на структуру мартенсита с включениями цементита. Такие инструменты обладают повышенной износостойкостью и высокой твердостью (*HRC* 62...64) на рабочих гранях. Однако углеродистые стали обладают низкой теплоустойчивостью (до 200 °С). В связи с этим инструменты из этих сталей пригодны для обработки сравнительно мягких материалов и при небольших скоростях резания.

Заэвтектоидные стали используют также для изготовления измерительных инструментов (калибры простой формы и невысоких классов точности) и небольших штампов холодной высадки и вытяжки, работающих при невысоких нагрузках.

Стали У7, У8, У9, обладающие более высокой вязкостью, используются для изготовления инструментов, подвергающихся ударам: деревообрабатывающих, слесарных, кузнечных, а также пуансонов, матриц и т. п. После полной закалки их отпускают на структуру троостита (*HRC* 48...55).

Легированные стали используются для изготовления всех видов инструмента.

Для *ударно-штамповочного инструмента*, нагруженных штампов, деформирующих металл в холодном состоянии, применяют высоколегированную хромовую сталь, например, Х12 (2,0...2,2 % углерода и 11,5...13,0 % хрома), Х12ВМ и др. После закалки и многократного отпуска эти стали имеют твердость 60...62 *HRC* и высокую износостойчивость.

Для *тяжелонагруженных штампов*, деформирующих металл в горячем состоянии, применяют сталь марок 5ХНМ и 5ХГМ. После термической обработки штампы становятся твердыми и износостойчивыми. При этом важно добиться повышенной вязкости, что обеспечивается термоциклической обработкой с последующим охлаждением в воде или в масле.

Для изготовления измерительного инструмента высокого класса точности (калибров, измерительных плиток, микрометров) применяют высокоуглеродистые стали 12Х1, 9Х1, Х; которые имеют высокую твердость и износостойчивость, а также малый коэффициент теплового расширения.

Низколегированная сталь для режущего инструмента по своей режущей способности существенно не отличается от углеродистой стали и применяется при небольших скоростях резания, поскольку теряет

твердость уже при температуре 200...220 °С. Однако эта сталь имеет меньшую критическую скорость закалки по сравнению с углеродистой и поэтому обладает более высокой прокаливаемостью, что позволяет получить структуру мартенсита в более крупных сечениях инструмента. Кроме того, данная сталь менее хрупкая, чем углеродистая. Основными легирующими элементами для сталей всех марок являются хром (1...3 %), а также вольфрам. Сталь 9ХС применяют для изготовления резцов, сверл, фрез, зенкеров, разверток; стали ХВГ, 9Х5ВФ — для сверл, метчиков, разверток; сталь ХВ5 — инструментов, работающих по твердым материалам. Эти стали используются также для изготовления вытяжных и высадочных штампов. После закалки и низкого отпуска низколегированные стали имеют твердость 60...62 *HRC*, а сталь ХВ5 — до 65 *HRC*.

Быстрорежущая сталь. Это высоколегированная инструментальная сталь, обладающая красностойкостью, т. е. не теряющая твердости при нагреве до температуры 600...640 °С. Имеются следующие марки быстрорежущей стали: Р18, Р12, Р9, Р6М3, Р9Ф5, Р5М5, Р6М5К5, Р9М4К8, Р14Ф4, Р9К5, Р9К10, Р10К5Ф5, Р18Ф2, Р18К5Ф2. Следующая в марке стали за буквой Р цифра указывает среднее массовое содержание вольфрама (в процентах). При этом массовое содержание хрома (около 4 %) в обозначении данных марок стали не указывается.

Сталь марок Р9, Р12 и Р18 применяют для всех видов режущих инструментов при обработке многих конструкционных материалов; сталь Р6М5 — для резбонарезных инструментов, работающих с ударными нагрузками; Р18К5Ф2, Р9М4К8, Р6М5К5 — для обработки вязких материалов (коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов); сталь, содержащую ванадий (Р9Ф5, Р14Ф4, Р9К5Ф5) — для отделочных операций при обработке сплавов титана и материалов с абразивными свойствами (пластмасс, фибры, эбонита).

По структуре в равновесном состоянии быстрорежущая сталь относится к карбидному классу. Послековки и отжига данная сталь имеет перлитно-сорбитную структуру с включениями зерен легированных карбидов. Термическая обработка этой стали состоит из закалки с температурой нагрева до 1260...1300 °С и двух- или трехкратного отпуска для уменьшения количества остаточного аустенита. Высокая температура закалки необходима для растворения воз-

можно большего количества карбидов в аустените, чтобы получить мартенсит, более насыщенный легирующими элементами и стойкий к уменьшению твердости. После закалки сталь состоит из мартенсита и остаточного аустенита (около 30 %). Последующим отпуском удается уменьшить содержание остаточного аустенита и сталь после отпуска становится красностойкой. Для более полного превращения остаточного аустенита в мартенсит применяют также обработку холодом, т. е. охлаждение закаленной стали до температуры $-80 \dots -100$ °С. В этом случае достаточен предшествующий обработке холодом однократный отпуск.

2.2. АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Алюминий (Al) — это легкий цветной металл (его плотность составляет $2,71 \text{ г/см}^3$) с невысокой температурой плавления (660 °С). По распространенности в земной коре Al занимает первое место — 8,8 % (для сравнения Fe — 4,65 %, Mg — 2,4 %, Ti — $6,3 \cdot 10^{-3}$ %, Ni — $8 \cdot 10^{-3}$ %, Cu — $4,7 \cdot 10^{-3}$ %). Его предел прочности при растяжении $\sigma_b = 80 \dots 100$ МПа; твердость — 25 HB. Алюминий отличается пластичностью, легко поддается обработке давлением. После холодной прокатки алюминия его предел прочности (σ_b) увеличивается до $180 \dots 250$ МПа, а твердость — до 45...60 HB. Впервые алюминий в свободном виде получил в 1825 г. датский ученый Х.К. Эрстед. Однако высокая химическая активность алюминия и, следовательно, высокая стойкость образуемых химических соединений долго не позволяли наладить его производство. Кроме того, производство алюминия требует больших энергетических затрат. Наличие мощных электростанций и создание надежных технологий получения этого металла из руды, выдвинули алюминий и его сплавы на одно из ведущих мест среди цветных металлов по значимости и объему применения в современном машиностроении.

В полупроводниковой и ядерной технике и химической промышленности используется алюминий высокой чистоты (марок А995, А99, А97, А95), содержащий от 0,005 до 0,05 % примесей. Алюминий промышленной чистоты (марок А85, А8, А7, А6, А5, А0, А, АЕ), содержащий от 0,15 до 1 % примесей, используется в электротехнической промышленности, а также для производства

сплавов. Чистый алюминий в машиностроении используется незначительно (в основном, применяются сплавы алюминия).

Для получения сплавов используется алюминий, выпускаемый в виде чушек.

Сплавы на основе алюминия классифицируются по степени упрочнения после термической обработки, по эксплуатационным свойствам, по технологии изготовления деталей. По последнему признаку различают алюминиевые сплавы литейные и деформируемые. Основными примесями в алюминии и его сплавах являются Fe и Si. Железо, образуя интерметаллиды, снижает пластичность алюминия и его сплавов. В отношении термической обработки сплавы алюминия бывают не упрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Алюминиевые сплавы образуют твердые растворы, эвтектики, интерметаллидные фазы. Для них применяют закалку и старение, а также отжиг. При закалке температура нагрева сплава находится в интервале $485 \dots 525$ °С. При этом для каждого сплава используется более узкий интервал в пределах этих температур, поскольку повышение температуры выше закалочной ведет к пережогу (оплавлению по границам зерен). Выдержка при нагреве должна быть минимальной, обеспечивающей полное растворение избыточных фаз в твердом растворе. После охлаждения детали подвергают старению. Старение производится при комнатной температуре (естественное старение) и продолжается несколько суток или при температуре $150 \dots 200$ °С — 10...24 часа (искусственное старение). Закалка и старение увеличивают твердость и σ_b обрабатываемых сплавов. Для некоторых сплавов при оптимальных условиях старения эти показатели могут увеличиться в два раза.

Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг сплава производится перед его обработкой давлением для устранения в слитках дендритной ликвации, которая приводит к неоднородности структуры, и измельчению зерна. Такой отжиг производится при температуре $450 \dots 520$ °С с последующим охлаждением сплава вместе с печью или на воздухе.

Рекристаллизационный отжиг производят при нагреве сплава до температуры $350 \dots 500$ °С (в зависимости от состава сплава).

Для разупрочнения закаленных сплавов производят их отжиг при температуре $350 \dots 460$ °С с выдержкой при этой температуре 1,5...2 часа. При этом происходит полный распад пересыщенных твердых растворов и коагуляция упрочняющих фаз.

Сплавы для изготовления фасонных отливок (кроме свойств, определяемых условиями эксплуатации) должны обладать хорошими литейными свойствами.

Алюминиевые литейные сплавы (ГОСТ 1583—93) маркируются буквами и цифрами. Буква «А» в марке сплава означает, что сплав алюминиевый литейный, а остальные буквы обозначают элементы, входящие в его состав (К — кремний; М — медь; Н — никель; Ц — цинк; Су — сурьма; Мг — магний; Кд — кадмий; Мц — марганец). Цифры после букв обозначают среднюю массовую долю соответствующего элемента (в %). Буквы в конце марки сплава обозначают следующее: «ч» — чистый; «пч» — повышенной чистоты; «оч» — особой чистоты; «л» — литейные сплавы; «с» — селективный. Рафинированные сплавы в чушках обозначают буквой «р», которую ставят после обозначения марки сплава.

В составе литейных сплавов (при литье в песчаные формы) допускается содержание 0,5...1 % Fe, а при литье в кокиль — 0,8...1,4 % Fe. Кремний не оказывает вредного влияния на литейные сплавы и используется в качестве основного или вспомогательного легирующего элемента.

Для производства основной массы изготавливаемых деталей применяются пять групп литейных алюминиевых сплавов. Это Al-Si (силумины), Al-Cu-Si (алькусины), Al-Cu, Al-Mg и сложнелегированные сплавы.

Выделено семь элементов, которые могут служить основными легирующими элементами в алюминиевых сплавах, — серебро (Ag), германий (Ge), литий (Li), цинк (Zn), магний (Mg), медь (Cu), кремний (Si). Все они образуют с алюминием системы эвтектического типа, но из-за высокой стоимости Ag, Ge и Li сплавы, легированные этими элементами, применяются очень ограниченно. Цинк применяется для растворного упрочнения литейных сплавов, но он не образует интерметаллидов и не обеспечивает значительного упрочнения. В этой связи основными легирующими элементами в алюминиевых сплавах являются Mg, Cu и Si. Образование интерметаллидов в сплавах Al-Cu, Al-Mg и Al-Mg-Si, а также отличная жидкотекучесть и малая усадка (линейная усадка для большинства сплавов составляет 0,9...1,3 %) Al-Si сплавов, переменная растворимость элементов в твердом состоянии в сплавах Al-Cu и Al-Mg позволяют получать качественные отливки и использовать различ-

ные методы упрочнения сплавов, включая дисперсное твердение путем закалки и старения. Вспомогательные легирующие элементы (Mn, Cr, V, Ti, Zr, Mo, Ni и др.) дополнительно упрочняют отливки по растворному типу, улучшают пластичность сплавов и повышают их жаропрочность, а другие вспомогательные легирующие элементы (Na, K, Be, Ca, Cd и др.) используются в виде небольших добавок (до 0,2 %) для улучшения технологических свойств в качестве модификаторов.

Основными особенностями алюминиевых сплавов, которые необходимо учитывать при плавке, являются склонность этих сплавов к газопоглощению (особенно водорода) и легкая окисляемость. В последующем водород, выделяясь при кристаллизации и охлаждении, способствует образованию газовой пористости в отливках, а включения Al_2O_3 существенно снижают механические свойства сплава. Для защиты от этих нежелательных явлений производят плавку алюминиевых сплавов под слоем флюса, перед заливкой проводят дегазацию расплава, его рафинирование хлором и азотом, а для получения мелкозернистой структуры и улучшения механических свойств сплава применяют модифицирование фтористыми и хлористыми соединениями.

Твердость литейных алюминиевых сплавов (в зависимости от их состава и методов термической обработки) составляет от 500 до 1000 НВ, а σ_b — от 130 до 360 МПа.

Максимальная рабочая температура применяемых в промышленности алюминиевых сплавов составляет 300...350 °С.

Для изготовления отливок в промышленности используют пять групп алюминиевых сплавов (ГОСТ 1583—93):

I. Сплавы на основе системы «алюминий—кремний» (силумины): марки АК12; АК13; АК9; АК9с; АК9ч; АК9пч; АК8л; АК7; АК7ч; АК7пч; АК10Су;

II. Сплавы на основе системы «алюминий—медь—кремний» (алькусины): марки АК5М; АК5Мч; АК5М2; АК5М7; АК6М2; АК8М; АК5М4; АК8М3; АК8М3ч; АК9М2; АК12М2; АК12ММгН; АК12М2МгН; АК21М2,5Н2,5;

III. Сплавы на основе системы «алюминий—медь»: марки АМ5; АМ4,5Кд;

IV. Сплавы на основе системы «алюминий—магний»: марки АМг4К1,5М; АМг5К; АМг3Мц; АМг6л; АМг6лч; АМг10; АМг10ч; АМг11; АМг7;

Области применения литейных алюминиевых сплавов

Группа	Марка сплава	Области применения
I	AK12	Герметичные детали небольших размеров. Детали, испытывающие ударные нагрузки, тонкостенные детали сложной конфигурации. Детали, применяемые в автомобиле- и тракторостроении (картеры, блоки цилиндров, поршни двигателей внутреннего сгорания). Изделия пищевого назначения (теплообменники, мясорубки)
	AK9 AK7	Отливки сложных по конфигурации, статически нагруженных деталей (корпуса водяных насосов, компрессоров, картеры и блоки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, системы водяного охлаждения, турбинные колеса турбохолодильников, вентиляторов, арматура и посуда)
	AK7пч	Сложные по конфигурации детали агрегатов и приборов, испытывающие средние нагрузки и работающие при температуре до 200 °С
	AK8л	Отливки крупных корпусных деталей, сложных по конфигурации и работающих под большим внутренним давлением газа или жидкости
II	AK8М	Нагруженные детали (блоки цилиндров, головки блоков и другие детали автомобильных двигателей)
	AK8М3ч	Силовые и герметичные детали с рабочими температурами до 250 °С, изготавливаемые литьем под давлением и другими методами точного литья
	AK5М	Головки цилиндров двигателей воздушного охлаждения, детали агрегатов и приборов, работающих при температуре не выше 250 °С
III	AM5	Крупногабаритные отливки ответственных деталей, работающих в условиях повышенных статических и ударных нагрузок, при низких и повышенных (до 300 °С) температурах
IV	AMг10, AMг10ч	Используются вместо дефицитных бронз, латуней, коррозионно-стойких сталей. Силовые детали, работающие при температурах от -60 до +60 °С. Детали, работающие в различных климатических условиях, включая воздействие морской воды и тумана

V. Сплавы алюминия с прочими компонентами (сложнолегированные): марки АК7Ц9; АК9Ц6; АЦ4Мг.

Сплавы системы *алюминий–кремний (силумины)* получили наибольшее распространение. Они обладают лучшими из всех алюминиевых сплавов литейными свойствами и широко применяются для отливок деталей, отличающихся сложностью очертаний или несущих большие нагрузки. Силумины обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью. Изготавливаемые из них детали защищают анодированием и лакокрасочными покрытиями. Силумины широко используют в промышленности (авиационной, машиностроительной, судостроительной и электротехнической).

Добавление меди к сплавам Al—Si повышает их твердость и предел прочности при растяжении, а также значительно улучшает обрабатываемость резанием. Тройные сплавы Al—Cu—Si (*алькусины*) применяются при изготовлении особо ответственных деталей (например, головок цилиндров двигателей, поршней, деталей, работающих при повышенной температуре, и др.). Эти сплавы используют в промышленности для изготовления деталей необходимой прочности, сохраняющих постоянство размеров в процессе эксплуатации и имеющих высокую чистоту обработанной поверхности.

Сплавы системы Al—Cu имеют пониженные литейные свойства, малую коррозионную стойкость и недостаточную пластичность, но хорошо обрабатываются резанием. Эти сплавы применяют для отливки небольших ответственных деталей машин и приборов, несущих высокую нагрузку (статическую и ударную).

Сплавы системы Al—Mg обладают малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью и прочностью. Их применяют для изготовления сильно нагруженных деталей. Однако эти сплавы плохо работают при повышенных температурах. Из этих сплавов изготавливают арматуру и корпуса машин, устанавливаемых на морских судах.

Сложнолегированные сплавы алюминия применяют для изготовления отливок, работающих при повышенных температурах и давлениях, с повышенной стабильностью размеров, а также для изготовления сварных конструкций и деталей, хорошо обрабатывающихся резанием.

Области применения некоторых марок литейных алюминиевых сплавов представлены в таблице 2.10.

Для повышения механических свойств отливок из алюминиевых сплавов их часто подвергают термической обработке, после которой в некоторых случаях прочность отливок увеличивается почти в два раза.

К группе деформируемых относятся сплавы на основе алюминия (табл. 2.11), перерабатываемые в изделия методами деформирования (прессованием, волочением, ковкой, штамповкой, прокаткой). Среди этих сплавов различают сплавы, упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой.

Таблица 2.11

Состав деформируемых алюминиевых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов в сплаве (остальное Al), %			
	Cu	Mg	Mn	прочие
АМц*	—	—	—	—
АМг2*	—	1,8...2,6	0,2...0,6	—
АМг6*	—	5,8...6,8	0,5...0,8	0,02...0,1 Ti
Д1**	3,8...4,8	0,4...0,8	0,4...0,8	0,002...0,005 Be
Д16**	3,8...4,9	1,2...1,8	0,3...0,9	—
Д18**	2,2...3,0	0,2...0,5	—	—
В95***	1,4...2,0	1,8...2,8	0,2...0,6	0,01...0,25Cr 5...7 Zn
АК6***	1,8...2,6	0,4...0,8	0,4...0,8	0,7...1,2 Si
АК8***	3,9...4,8	0,4...0,8	0,4...1,0	0,6...1,2 Si

* Механические свойства после отжига.
 ** Механические свойства после закалки и естественного старения.
 *** Механические свойства после закалки и искусственного старения

В группе деформируемых сплавов алюминия, упрочняемых термической обработкой, различают сплавы нормальной прочности, высокопрочные сплавы, жаропрочные сплавы и сплавы дляковки и штамповки.

Типичным представителем сплавов нормальной прочности являются дуралюмины, относящиеся к системе Al–Cu–Mg, которые маркируются буквой «Д». Марганец повышает коррозионную стойкость, температуру рекристаллизации и улучшает механические свойства дуралюминов (табл. 2.12).

Механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Марка сплава	Механические свойства сплава					Вид полуфабриката
	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_{-1}	δ , %	НВ, МПа	
АМц*	130	50	55	20	300	Листы
АМг2*	190	100	125	23	450	Листы
АМг6*	340	170	—	20	700	Листы
Д1**	400	240	105	20	950	Листы, прессованные прутки.
	480	320	125	14	—	
Д16**	440	330	115	18	1050	Листы, плиты, прессованные прутки
	530	400	140	11	—	
Д18**	300	170	95	24	700	Проволока
В95***	540	470	150	10	1500	Листы, плиты, прессованные прутки
	600	560	150	8	1500	
АК6***	400	299	125	12	1000	Поковки
АК8***	480	380	130	9	1350	Поковки

* Механические свойства после отжига.
 ** Механические свойства после закалки и естественного старения.
 *** Механические свойства после закалки и искусственного старения

Для упрочнения сплавов применяют закалку с последующим охлаждением в холодной воде. Закаленные дуралюмины подвергают старению, способствующему увеличению их коррозионной стойкости. В процессе естественного (несколько суток) или искусственного старения (10...24 ч) повышается прочность сплава вследствие распада пересыщенного твердого раствора.

Дуралюмины широко применяются в авиации. Так, из сплава Д1 изготавливают лопасти винтов, из Д10 — несущие элементы фюзеляжей самолетов, а сплав Д1В является одним из основных клепочных материалов. Из дуралюминов обработкой давлением производят полуфабрикаты (прутки, полосы, листы и т. д.)

К высокопрочным сплавам алюминия относят сплавы (В95, В96), системы Al–Zn–Mg–Cu. В качестве легирующих добавок используют марганец и хром, которые увеличивают коррозионную стой-

кость и эффект старения сплава. Для достижения требуемых прочностных свойств ($\sigma_b = 600 \dots 700$ МПа) сплавы закаляют при температуре $460 \dots 480$ °С с последующим искусственным старением при температуре $120 \dots 140$ °С. Высокопрочные сплавы превосходят дуралюмины по прочностным показателям, но менее пластичны и более чувствительны к концентраторам напряжений, а также воздействию коррозионных сред под напряжением. Для повышения коррозионной стойкости изделий их плакируют сплавом Al+1% Zn. Высокопрочные сплавы применяют в авиационной промышленности для изготовления наружных конструкций с температурой длительной эксплуатации до 120 °С.

Для изделий, эксплуатируемых при температурах до 300 °С, используют жаропрочные сплавы АК-4, АК-4-1. Они имеют сложный химический состав, легированы железом, никелем, медью и другими элементами, образующими упрочняющие фазы CuAl_2 , CuMgAl_2 , $\text{Al}_{12}\text{Mg}_2\text{Cu}$ и др. Жаропрочность сплавам придает легирование медью, марганцем и титаном, замедляющими диффузионные процессы. Детали из жаропрочных сплавов используют после закалки и искусственного старения.

Сплавы дляковки иштамповки обладают высокой пластичностью и удовлетворительно перерабатываются литьем. При горячем деформировании в этих сплавах не образуются трещины. Типичными представителями таких материалов являются сплавы системы Al—Cu—Mg с добавками кремния (АК 0, АК 8). Ковку и штамповку этих сплавов производят при температуре $450 \dots 475$ °С. Затем применяют закалку и старение. Из этих сплавов изготавливают поковки и прокат.

К неупрочняемым термической обработкой деформируемым сплавам относят сплавы систем Al—Mn, Al—Mg. Они отличаются высокой пластичностью, коррозионной стойкостью, хорошо свариваются. Сплавы этой группы используют в отожженном, нагартованном и полунангартованном видах.

Для устранения дендритной ликвации деформируемых сплавов проводят гомогенизирующий отжиг слитков при температуре $450 \dots 520$ °С в течение $4 \dots 40$ ч с последующим охлаждением на воздухе или в печи. Деформированные заготовки подвергают рекристаллизационному отжигу при температуре $350 \dots 500$ °С в течение $0,5 \dots 2$ ч. Эта операция способствует снятию наклепа и получе-

нию мелкозернистой структуры металла. Из неупрочняемых сплавов изготавливают емкости для жидкостей, трубы, корабельные конструкции, детали вагонов.

2.3. МАГНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Магний (Mg) — это легкий цветной металл с невысокой температурой плавления (650 °С). В земной коре содержится $2,4$ % Mg. Его предел прочности при растяжении $\sigma_b = 80 \dots 100$ МПа; твердость по Бринеллю литого магния составляет 294 МПа.

У магния и его сплавов низкая плотность ($\rho = 1,74$ г/см³), они отличаются хорошей обрабатываемостью резанием и способностью воспринимать ударные и гасить вибрационные нагрузки. Теплопроводность магния в $1,5$, а электропроводимость — в 2 раза ниже, чем у алюминия. Примерно в $1,5$ раза меньше, чем у алюминия и модуль нормальной упругости магния. Однако эти металлы близки по удельной жесткости. В зависимости от содержания примесей установлены следующие марки магния (ГОСТ 804—72): Mg96 (99,96 % Mg), Mg95 (99,95 % Mg), Mg90 (99,90 % Mg). Примеси Fe, Nb, Cu, Si понижают и без того низкие пластичность и коррозионную стойкость. При нагреве магний активно окисляется и на воздухе (при температуре выше 623 °С) воспламеняется. Это затрудняет плавку и разливку магния и его сплавов. Порошок, тонкая лента, мелкая стружка магния представляют большую опасность, поскольку самовозгораются на воздухе при обычных температурах и горят с выделением большого количества теплоты, излучая ослепительно яркий свет.

Литой магний имеет крупнокристаллическую структуру и низкие механические свойства ($\sigma_b = 110 \dots 120$ МПа; $\sigma_{02} = 20 \dots 30$ МПа; $\delta = 6 \dots 8$ %; HB 300). Модифицирование цирконием и пластическая деформация, приводящие к измельчению структуры, несколько улучшают механические свойства литого магния ($\sigma_b = 260$ МПа; $\delta = 9$ %). Отжиг для снятия наклепа проводят при температуре $330 \dots 350$ °С, в результате чего магний имеет следующие свойства: $\sigma_b = 190$ МПа; $\sigma_{02} = 98$ МПа; $\delta = 15 \dots 17$ %; HB 400. Наклеп для упрочнения магния применяют редко, поскольку он вызывает анизотропию свойств.

Низкая пластичность магния при температуре 20...25 °С объясняется тем, что в металлах с гексагональной кристаллической решеткой скольжение происходит только по базисным плоскостям. Повышение температуры приводит к появлению новых плоскостей скольжения и двойникования и, как следствие, к увеличению пластичности. В связи с этим обработку магния давлением проводят при температуре 350...450 °С в состоянии наибольшей пластичности.

Чистый магний из-за его низких механических свойств как конструкционный материал практически не применяется.

Достоинством магниевых сплавов является их высокая удельная прочность. Временное сопротивление отдельных сплавов при их плотности менее 2 г/см³ достигает 250...400 МПа. Основными легирующими элементами магниевых сплавов являются Al, Zn, Mn. Для дополнительного легирования используют цирконий, кадмий, церий, неодим и др. Механические свойства сплавов магния улучшаются при легировании алюминием, цинком, цирконием (при температуре 20...25 °С), при повышенной температуре — добавкой церия, неодима и особенно тория.

Увеличение растворимости легирующих элементов в магнии с повышением температуры позволяет упрочнять магниевые сплавы с помощью закалки и искусственного старения. Однако термическая обработка магниевых сплавов затруднена из-за замедленных диффузионных процессов в магниевом растворе. Малая скорость диффузии требует больших выдержек при нагреве под закалку (до 16...30 ч) для растворения вторичных фаз. Благодаря этому такие сплавы можно закалывать на воздухе, они не склонны к естественному старению. При искусственном старении необходимы высокие температуры (до 200 °С) и большие выдержки (до 16...24 ч). Наибольшее упрочнение достигается термической обработкой сплавов магния, легированных неодимом.

Временное сопротивление и особенно предел текучести магниевых сплавов значительно повышаются с помощью термомеханической обработки, которая состоит в пластической деформации закаленного сплава перед его старением. Из других видов термической обработки к магниевым сплавам применимы различные виды отжига.

Магниевые сплавы хорошо обрабатываются резанием (лучше, чем стали, алюминиевые и медные сплавы), легко шлифуются и полируются. Высокие скорости резания и небольшой расход энергии способствуют снижению стоимости обработки резанием деталей из магниевых сплавов по сравнению с другими сплавами. Они удовлетворительно

свариваются сваркой (шовной и дуговой). Дуговую сварку рекомендуется проводить в защитной среде из инертных газов. Прочность сварных швов деформируемых сплавов составляет 90 % от прочности основного металла.

К недостаткам магниевых сплавов, наряду с низкой коррозионной стойкостью и малым модулем упругости, следует отнести плохие литейные свойства, склонность к газонасыщению, окислению и воспламенению при приготовлении. Плавку и разливку магниевых сплавов ведут под специальными флюсами.

По технологии изготовления магниевые сплавы подразделяют на литейные (МЛ) и деформируемые (МА); по механическим свойствам — на сплавы невысокой и средней прочности, высокопрочные и жаропрочные; по склонности к упрочнению с помощью термической обработки — на сплавы, упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой. Для повышения пластичности магниевых сплавов их производят с пониженным содержанием вредных примесей (повышенной чистоты). В этом случае к марке сплава добавляют строчные буквы «пч» (например, МЛ15пч или МА2пч).

Деформируемые магниевые сплавы. Химический состав (ГОСТ 14957—76) и типичные механические свойства некоторых деформируемых сплавов представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13

Свойства деформируемых магниевых сплавов (после закалки и старения)

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Mg), %				Механические свойства		
					σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %
	Mn	Zn	Al	прочие	МПа		
МА5	0,15...0,5	0,2...0,8	7,8...9,2	—	320	220	14
МА11	1,5...2,5	—	—	2,5...4,0 Nd 0,1...0,25 Ni	280	140	10
МА14	—	5,0...6,0	—	0,3...0,9 Zr	350	300	9
МА19	—	5,5...7,0	—	0,5...1,0 Zr 0,2...1,0 Cd 1,4...2,0 Nd	380	330	5

Среди деформируемых сплавов наибольшей прочностью обладают сплавы магния с алюминием и сплавы магния с цинком, легированные цирконием, кадмием, серебром, редкоземельными металлами.

Сплавы магния с алюминием содержат 0,2...1,5 % Zn (МА5). Алюминий и цинк обладают высокой растворимостью в магнии. Цинк и алюминий придают сплавам хорошую технологическую пластичность, что позволяет изготавливать из них кованые и штампованные детали сложной формы (например, крыльчатки и жалюзи капота самолета).

Сплавы магния с цинком, легированные цирконием, имеют высокие значения σ_b и σ_{02} . Большой эффект дает старение, проведенное непосредственно после прессования (штамповки). Такие сплавы применяют для изготовления несвариваемых сильно нагруженных деталей (обшивки самолетов, деталей грузоподъемных машин, автомобилей, ткацких станков и др.).

Литейные магниевые сплавы. По химическому составу многие литейные сплавы магния близки к деформируемым (табл. 2.14).

Таблица 2.14

Химический состав и механические свойства литейных магниевых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Mg), %				Механические свойства		
	Mn	Zn	Al	прочие	σ_b	σ_{02}	δ , %
МЛ15*	0,15... 0,5	0,2... 0,8	7,5... 9,0	—	255	120	6
МЛ8*	—	5,5... 6,6	—	0,7...1,1 Zr 0,2...0,8 Cd	255	155	5
МЛ12*	—	4,0... 5,0	—	0,6...1,1 Zr	270	160	6
МЛ9	—	—	—	0,4...1,0 Zr 0,2...0,8 Y 1,9...2,6 Nd	200	95	8
МЛ10	—	0,1... 0,7	—	0,4...1,0 Zr 2,2...2,8 Nd	200	95	6
МЛ15	—	4,0... 5,0	—	0,7...1,1 Zr 0,6...1,2 La	210	130	3

* Свойства приведены после закалки и старения

Преимуществом литейных сплавов перед деформируемыми является значительная экономия металла при производстве деталей, поскольку высокая точность размеров и хорошая чистота поверхности

отливок почти исключают их обработку резанием. Однако из-за грубозернистой литой структуры они имеют более низкие механические свойства (особенно пластичность). Улучшение механических свойств литейных сплавов достигается различными способами: перегревом, модифицированием, гомогенизацией отливок, а также применением особо чистых шихтовых материалов при приготовлении сплавов. Перегрев дает хорошие результаты в сплавах с алюминием, выплавленных в железных тиглях. В результате взаимодействия алюминия с железом образуются частицы соединения $FeAl_3$, которые являются дополнительными центрами кристаллизации.

Для модифицирования используют цирконий, магнезит, мел. При гомогенизации происходит растворение грубых интерметаллидных фаз, охрупчивающих сплавы. Механические свойства литейных магниевых сплавов, в основном, находятся на уровне свойств литейных алюминиевых сплавов, но, обладая меньшей плотностью, магниевые сплавы превосходят их по удельной прочности.

Наибольшее применение нашли сплавы системы Mg—Al—Zn, особенно сплавы с повышенным содержанием алюминия. Для сплавов этой системы характерен более широкий, чем у алюминиевых сплавов, интервал кристаллизации. В результате сплавам этой системы присущи пониженная жидкотекучесть, усадочная пористость, склонность к образованию горячих трещин. С увеличением содержания алюминия литейные свойства сплава сначала ухудшаются, поскольку увеличивается интервал кристаллизации, а затем (при проявлении неравновесной эвтектики) — улучшаются; повышаются прочностные характеристики. Однако из-за большого количества интерметаллидных фаз (в том числе и эвтектических) сплавы с большим содержанием алюминия обладают пониженной пластичностью. Наилучшее сочетание литейных и механических свойств имеют сплавы, содержащие 7,5...10 % Al (МЛ15, МЛ16). Небольшие добавки цинка способствуют улучшению технологических свойств. Гомогенизация при температуре 420 °С (продолжительностью 12...24 ч) и закалка от этой температуры способствуют повышению прочности и пластичности. Из-за малой скорости диффузии алюминия в магнии сплавы закаляются при охлаждении на воздухе. Последующее старение при температуре 170...190 °С дополнительно повышает временное сопротивление и особенно предел текучести сплавов. Малая плотность магниевых сплавов, а в от-

дельных случаях и высокая удельная прочность этих сплавов способствуют их широкому применению. Они применяются:

- 1) в самолетостроении (корпуса приборов, насосов, коробок передач, фонари и двери кабин и т. д.),
- 2) в ракетной технике (корпуса ракет, обтекатели, топливные и кислородные баки, стабилизаторы),
- 3) в конструкциях автомобилей, особенно гоночных (корпуса, колеса, помпы и проч.),
- 4) в приборостроении (корпуса и детали приборов).

Из-за малой способности к поглощению тепловых нейтронов эти сплавы используют в атомной технике, а учитывая их высокую демпфирующую способность, — при производстве кожухов для электронной аппаратуры.

Более высокими технологическими и механическими свойствами при температуре 20...25 °С и повышенных температурах обладают сплавы магния с цинком и цирконием, а также сплавы, дополнительно легированные кадмием, редкоземельными элементами. Редкоземельные элементы улучшают литейные свойства сплавов. Они снижают склонность сплавов к образованию горячих трещин и пористости, увеличивают прочность при обычных и повышенных температурах. Цирконий значительно измельчает крупнозернистую структуру отливок, способствует очистке сплавов от вредных примесей, а также благоприятно влияет на свойства твердого раствора, повышает температуру рекристаллизации. Кадмий улучшает механические и технологические свойства сплавов. Высокопрочные литейные сплавы применяют для нагруженных деталей самолетов и авиадвигателей (корпусов компрессоров, картеров, ферм шасси, колонок управления и др.).

2.4. ТИТАН И ЕГО СПЛАВЫ

Титан (Ti) плавится при высокой температуре (1668 °С), а по плотности (4,5 г/см³) занимает промежуточное место между алюминием и железом. По прочности титановые сплавы не уступают сталям. По распространенности в земной коре титан занимает четвертое место после алюминия, железа и магния. Но промышленное применение титана началось только в 1948 г. Это объясняется высокой

стойкостью химических соединений титана и его высокой реакционной способностью в расплавленном состоянии. В настоящее время производство титана и его сплавов в мире постоянно увеличивается. Высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, достаточное распространение в природе способствуют расширению областей использования титана в качестве конструкционного материала.

В чистом виде титан достаточно пластичен, имеет высокую удельную прочность и стоек к коррозии. При этом у титана низкий модуль упругости, невысокая жаропрочность и ему присуща ползучесть, т. е. способность медленно и непрерывно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки. На механические характеристики титана отрицательно влияют примеси водорода, азота, кислорода и углерода. Водород (при его содержании 0,01...0,005 %) снижает ударную вязкость, обуславливая водородную хрупкость. Эффективным способом борьбы с такой хрупкостью является вакуумирование сплавов. Азот, кислород и углерод (при содержании до 1 %) увеличивают твердость и прочность, значительно снижая пластичность. Поскольку титан обладает полиморфным $\alpha \leftrightarrow \beta$ превращением (882,5 °С), то свойства титана и его сплавов можно изменять термической обработкой. Выпускают технический титан, который маркируют в зависимости от содержания примесей ВТ 1-00 (примесей $\leq 0,398$ %), ВТ1-0 (примесей $\leq 0,55$ %). Титан наибольшей чистоты (иодидный) получают методом термической диссоциации из четырехиодидного титана (табл. 2.15).

Таблица 2.15

Механические свойства титана

Марка титана	Суммарное содержание примесей, %	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	НВ, МПа
		МПа		%		
ВТ1-0	0,3	450...600	380...500	20...25	50	2070
Иодидный	0,093	250...300	100...150	50...60	70...80	1300

Титан поддается обработке давлением в холодном и горячем состояниях (его можно ковать, прокатывать, штамповать и т. д.). Перерабатывают титан и его сплавы в прутки, полосы, профили проката, бесшовные трубы, проволоку, жести и фольгу. Чистый титан

применяют в электровакуумной технике для изготовления анодов, сеток и других деталей. Он хорошо сваривается сваркой (аргодуговой и точечной). Для защиты от коррозии титаном покрывают поверхности стальных изделий. Карбид титана используют в производстве титановольфрамовых твердых сплавов для режущих инструментов, жаростойких и жаропрочных сплавов, применяемых для изготовления деталей газовых турбин реактивных двигателей. Двоокись титана используют при изготовлении сегнетодиэлектриков, для приготовления эмалей и глазурей. Рутил, или техническую двоокись титана вводят в состав обмазки сварочных электродов. Гидрид титана служит источником чистого водорода.

Сплавы титана отличаются высокой механической прочностью, жаропрочностью, значительной коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах; многие сплавы — хорошей свариваемостью. Для повышения прочности сплавов их легируют марганцем, железом, алюминием, молибденом, хромом, ванадием, оловом и др. Почти все титановые сплавы легируют алюминием, который уменьшает их удельную массу, повышает удельную прочность, жаропрочность и снижает склонность к водородной хрупкости. Титановые сплавы классифицируют:

- 1) по технологии переработки (литейные и деформируемые);
- 2) механическим свойствам (нормальной прочности, жаропрочные, высокопрочные, повышенной пластичности);
- 3) по отношению к термической обработке (упрочняемые и не упрочняемые);
- 4) по структуре (α , псевдо- α , $\alpha+\beta$, β , псевдо- β).

Литейные свойства титановых сплавов определяются двумя особенностями: малым температурным интервалом кристаллизации и очень высокой реакционной способностью в расплавленном состоянии. Расплавленный титан быстро поглощает газы, содержащиеся в атмосфере, а также, энергично взаимодействует со всеми известными огнеупорами и формовочными материалами. В связи с этим, плавка титановых сплавов производится в вакууме или в среде нейтральных газов. Заливка может производиться в графитовые, корундовые и магнезитовые формы. Крупные фасонные отливки (массой до 300...500 кг) заливают в чугунные и стальные формы. Однако небольшой температурный интервал кристаллизации обеспечивает титановым сплавам хорошую жидкотекучесть

и достаточно высокую плотность получаемых из них отливок. Основным легирующим элементом титановых сплавов является Al. Для улучшения литейных свойств сплавов в них добавляют Si, Zn, Nb, Mo, V (в небольших количествах). Для фасонного литья применяют сплавы, аналогичные по составу деформируемым сплавам. Маркируются титановые сплавы буквами «ВТ» или «ОТ» и числом (условным номером). Буква «Л» в конце указывает, что сплав является литейным (ВТ9Л). Отливки из титановых сплавов обладают более низкими механическими свойствами, чем заготовки, полученные из аналогичных деформируемых сплавов (табл. 2.16).

Таблица 2.16

Состав и механические свойства деформируемых титановых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Ti), %				Структура	Механические свойства		
	Al	V	Mo	прочие		σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %
						МПа		
BT5	4,3...6,2	—	—	—	α -сплавы	700...950	600...850	10...15
BT5-1	4,0...6,0	—	—	2,0...3,0 Sn		750...950	650...850	10...15
OT4-1	1,0...2,5	—	—	0,7...2,0 Mn	Псевдо- α -сплавы	600...750	470...650	20...40
OT4	3,5...5,0	—	—	0,8...2,0 Mn		700...900	550...650	12...20
BT20	5,5...7,0	0,8...2,3	0,5...1,8	1,4...2,5 Zr	$(\alpha+\beta)$ -сплавы	950...1150	850...1000	8
BT6*	5,3...6,8	3,5...5,3	—	—		1100...1150	1000...1050	14...16
BT14*	3,5...6,3	0,8...1,9	2,5...3,8	—	$(\alpha+\beta)$ -сплавы	1150...1400	1080...1300	6...10
BT16*	1,6...3,8	4,0...5,0	4,5...5,5	—		1250...1450	1100...1200	4...6
BT22	4,8...5,2	4,5...5,5	4,5...5,5	0,8...1,2 Cr 0,8...1,2 Fe	$(\alpha+\beta)$ -сплавы	1100...1250	—	9

* Свойства этих сплавов приведены после закалки и старения, остальных — после отжига

К деформируемым сплавам титана (ГОСТ 19807–91) с α -структурой относятся сплавы с алюминием (BT5) и сплавы дополнительно легированные оловом (BT5-1) или цирконием. Они харак-

теризуются средней прочностью (при температуре 20 °С), высокими механическими свойствами при криогенных и повышенных температурах (450...500°С). Сплавы имеют высокую термическую стабильность свойств и обладают отличной свариваемостью. Недостатками сплавов являются неупрочняемость термической обработкой и низкая технологическая пластичность. Сплавы с оловом более технологичны. В горячем состоянии их куют, прокатывают, штампуют. Эти сплавы поставляют в виде прутков, сортового проката, поковок, труб и проволоки.

Псевдо- α -сплавы имеют преимущественно α -структуру и небольшое количество β -фазы (1...5 %) вследствие дополнительного легирования β -стабилизаторами (Mn, V, Nb, Mo и др.). Сохраняя достоинства α -сплавов, они, благодаря наличию β -фазы, обладают высокой технологической пластичностью. Сплавы с низким содержанием алюминия (2...3 %) обрабатываются давлением в холодном состоянии и только при изготовлении сложных деталей подогреваются до температуры 500...700 °С (ОТ4, ОТ4-1). Сплавы с большим содержанием алюминия при обработке давлением требуют подогрева до температуры 600...800 °С. Псевдо- α -сплавы с содержанием алюминия 7...8 % и легированные Zr, Si, Mo, Nb, V (BT20) используют в изделиях, работающих при наиболее высоких (среди титановых сплавов) температурах.

Двухфазные ($\alpha+\beta$)-сплавы обладают лучшим сочетанием технологических и механических свойств. Эти сплавы легированы, в основном, алюминием и β -стабилизаторами. Необходимость легирования алюминием обусловлена тем, что он значительно упрочняет α -фазу (при температуре 20 °С и повышенных температурах). Следует отметить, что β -стабилизаторы мало растворимы в этой фазе и потому не оказывают существенного влияния на ее свойства. В двухфазные сплавы титана вводят легирующие элементы, главным образом, являющиеся эвтектоидообразующими β -стабилизаторами. Эти сплавы упрочняются с помощью термической обработки (закалки и старения), в отожженном и закаленном состояниях имеют хорошую пластичность, а после старения — высокую прочность (при температуре 20...25°С и повышенных температурах). При этом, чем больше β -фазы содержится в структуре сплава, тем он прочнее в отожженном состоянии и сильнее упрочняется при термической обработке. По структуре, получаемой в ($\alpha+\beta$)-сплавах после закалки, их подразделяют на два класса: мартенситный и переходный.

Сплавы мартенситного класса менее легированы и содержат сравнительно немного β -фазы (5...25 %). К ним относятся: сплав BT6 (табл. 2.16), высокопрочные сплавы (BT14, BT16), сплавы для работы при повышенных температурах (BT25, BT3-1).

Сплавы переходного класса более легированы и содержат больше β -фазы (25...50 %).

Сплавы ($\alpha+\beta$) обрабатываются ковкой и штамповкой. Эти сплавы прокатываются легче, чем сплавы с α -структурой и поставляются в виде поковок, штампованных заготовок, прутков, листов, ленты.

Псевдо- β -сплавы — сплавы высоколегированные, в основном, β -стабилизаторами (суммарное количество легирующих элементов, как правило, превышает 20 %). Наиболее часто для легирования используют Mo, V, Cr, реже — Fe, Zr, Sn. Алюминий присутствует почти во всех сплавах, но в небольших количествах (~ 3 %). В равновесном состоянии сплавы имеют преимущественно β -структуру с небольшим количеством α -фазы. В этом состоянии сплавы обладают хорошей пластичностью и легко обрабатываются давлением. Они отличаются высокой удельной прочностью, обладают низкой склонностью к водородной хрупкости, удовлетворительно обрабатываются резанием. Наибольшее распространение в промышленности получил сплав BT15, который выпускается в виде листов, полос, прутков, поковок и рекомендуется для длительной работы при температуре до 350 °С.

3. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Истощение сырьевых запасов традиционных машиностроительных материалов и, как следствие, увеличение затрат энергии и человеческого труда, связанных с разведкой, добычей, переработкой и транспортировкой этих запасов вызвали необходимость разработки новых материалов на основе новых видов сырья, к которым относятся неметаллические материалы. К неметаллическим материалам относятся широкий круг органических и неорганических материалов. Среди органических материалов наиболее широко используются полимеры и материалы на основе этих полимеров. Детали из пластических масс, изделия из резины, клеи, герметики широко используются в современном машиностроении. Первые орудия труда были изготовлены человеком из камня, т. е. из неорганических материалов. Следующим шагом в использовании материалов было создание искусственных неорганических материалов — керамики (из глины). Неорганические неметаллические материалы требуют значительных энергетических затрат при обработке и применения инструментов с повышенными механическими характеристиками. Но разнообразие свойств этих материалов позволяет использовать их в различных (в том числе экстремальных) условиях эксплуатации. К неорганическим материалам относятся и самые твердые материалы, применяемые для обработки металлов резанием (алмаз, нитрид бора, корунд и др.), и относительно мягкие, используемые как твердые смазки (графит, дисульфид молибдена), и огнеупорные материалы, а также повсеместно используемое стекло. Особая роль в совершенствовании техники принадлежит композиционным материалам. Они не только сочетают в себе свойства входящих в них ингредиентов, но и новые свойства, не присущие составляющим их материалам. Этим обусловлено резкое увеличение производства и потребления композиционных материалов в атомной энергетике, авиации, космонавтике и др.

3.1. ПОЛИМЕРЫ

Полимер (от греческих слов *poly* — много и *meros* — доля, часть) — соединение с высокой молекулярной массой, макромолекулы которого состоят из очень большого числа простых, одинаковых, повторяющихся звеньев (мономеров) или повторяющихся группировок. Например, полиэтилен $[-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 -]_n$ образуется из мономера этилена $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$, где число n может достигать нескольких десятков тысяч единиц. Для макромолекулы полимера характерно то, что ее длина в тысячу раз и более превышает поперечный размер. Так, для полистирола при $n = 6000$ макромолекула имеет длину $1,5 \cdot 10^{-6}$ м, а ее поперечный размер равен $1,5 \cdot 10^{-9}$ м, т. е. в 1000 раз меньше. Простейшей моделью макромолекулы является нить, с насаженными на нее бусинками, причем эта нить находится в запутанном состоянии.

Молекулярная масса полимера может составлять от 5000 до 1000000 а.е.м. При таких больших размерах макромолекул свойства веществ определяются не только химическим составом этих молекул, но и их взаимным расположением и строением.

По происхождению полимеры могут быть *природными* и *синтетическими*. Природными полимерами являются белки, полисахариды, целлюлоза, крахмал, натуральный каучук, слюда, асбест, природный графит. К синтетическим полимерам относятся синтезированные высокомолекулярные вещества, полученные полимеризацией или поликонденсацией (синтетические смолы, волокна, каучуки и т. д.). При этом ведущей группой используемых полимеров являются синтетические полимеры.

Поскольку макромолекулы образуют цепи, состоящие из отдельных звеньев и простирающиеся в длину на расстояния в тысячи раз большие, чем их поперечные размеры, то макромолекулам свойственна гибкость (которая ограничена размером сегментов — жестких участков, состоящих из нескольких звеньев). Гибкость макромолекул является одной из отличительных особенностей полимеров.

Если макромолекула состоит из звеньев различной природы, то материал называется сополимером. Введение в полимер звеньев другой природы позволяет получить материал с требуемыми свойствами. Например, в сополимере стирола помимо основного звена содержится каучук, благодаря чему повышается ударная вязкость материала.

Макромолекулы полимеров могут иметь линейную, разветвленную или сетчатую (сшитую) структуры (рис. 3.1).

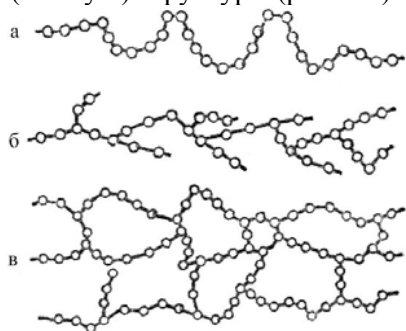


Рис. 3.1. Структуры полимеров:
а — линейная; б — разветвленная; в — сетчатая (сшитая)

Внутри макромолекулы между атомами во всех трех случаях действуют прочные ковалентные связи, энергия которых составляет 300...500 кДж/моль. У полимеров с линейной и разветвленной структурами между макромолекулами чаще всего действуют силы притяжения отрицательных и положительных частиц (силы Ван-дер-Ваальса), энергия которых составляет до 10 кДж/моль, т. е. в десятки раз меньше. У полимеров с сетчатой структурой между макромолекулами действуют, главным образом, прочные ковалентные связи.

Линейные полимеры обладают специфическими свойствами, в частности, способностью к образованию анизотропных высокоориентированных волокон и пленок, а также к большим обратимым деформациям. По мере перехода от линейных полимеров к разветвленным и сшитым полимерам комплекс их специфических свойств становится все менее выраженным. Трехмерные полимеры с очень большой частотой сетки этими свойствами вообще не обладают.

По химическому строению главной цепи различают гомоцепные и гетероцепные полимеры. Макромолекулы гомоцепных полимеров в составе главной цепи содержат одинаковые атомы (углерода, кремния, серы, фосфора и др.). Характерным представителем этой группы являются карбоцепные полимеры, главная цепь в молекулах которых состоит из атомов углерода. В макромолекулах гетероцепных полимеров в состав главной цепи входят различные атомы.

Полимеры могут находиться только в двух агрегатных состояниях (твердом и жидком). Перевод макромолекул полимеров в газообразное состояние без разрушения связей основной цепи невозможен.

3.1.1. Классификация полимеров

Учитывая связи состава и структуры со свойствами полимеров, их можно классифицировать по различным признакам (составу, форме макромолекул, фазовому состоянию, полярности, отношению к нагреву).

Все полимеры по состоянию во время нагрева и после охлаждения подразделяют на *термопластичные* и *термореактивные*.

Термопластичные полимеры (термопласты) — это полимеры, которые при нагреве размягчаются, даже плавятся, а при охлаждении затвердевают, не испытывая при этом никаких химических превращений (этот процесс обратим). Такое поведение полимеров объясняется тем, что при нагреве разрушаются слабые межмолекулярные связи, а ковалентные связи сохраняются. Это обстоятельство позволяет многократно перерабатывать термопласты.

Термопласты обладают повышенной пластичностью, но малой теплостойкостью, и растворимы в растворителях.

Термореактивные полимеры (реактопласты) — это полимеры, которые при нагревании претерпевают необратимые химические превращения, в результате которых твердеют, утрачивая растворимость и способность к изменению формы. Эти полимеры при повышении температуры не размягчаются, но при достижении достаточно высокой температуры разрушаются. Реактопласты не растворимы и могут только набухать в растворителях.

По составу полимеры подразделяют на *органические*, *элементоорганические* и *неорганические*.

Органические полимеры составляют наиболее обширную группу соединений. Если основная молекулярная цепь таких соединений образована только углеродными атомами, то они называются карбоцепными полимерами.

В гетероцепных полимерах атомы других элементов, присутствующие в основной цепи (кроме углерода) существенно изменяют свойства полимера. Так, в макромолекулах атомы кислорода способствуют повышению гибкости цепи, атомы фосфора и хлора по-

вышают огнестойкость, атомы серы придают газонепроницаемость, атомы фтора (даже в виде радикалов) сообщают полимеру высокую химическую стойкость и т. д. Органическими полимерами являются смолы и каучуки.

Элементоорганические соединения содержат в составе основной цепи атомы (Si, Ti, Al), сочетающиеся с органическими радикалами (CH₈, C₆H₅, CH₂). Эти радикалы придают материалу прочность и эластичность, а атомы (Si, Ti, Al) сообщают повышенную теплоустойчивость. В природе таких соединений не встречается. Представителями их являются кремнийорганические соединения.

К неорганическим полимерам относятся силикатная керамика, слюда, асбест. В составе этих соединений углеродный скелет отсутствует. Основу неорганических материалов составляют оксиды кремния, алюминия, магния, кальция и др.

В силикатах существуют два типа связей: атомы в цепи соединены ковалентными связями (Si–O), а цепи — ионными связями. Неорганические полимеры отличаются большой плотностью и высокой длительной теплоустойчивостью. Однако стекла и керамика являются хрупкими материалами и плохо переносят динамические нагрузки. К неорганическим полимерам относится графит, представляющий собой карбоцепной полимер.

По фазовому состоянию полимеры подразделяют на *аморфные* и *кристаллические*.

Аморфные полимеры однофазны. Структуры в этих полимерах флуктуационны, термодинамически нестабильны и характеризуются относительно коротким периодом существования. Аморфная фаза уменьшает жесткость системы, делает ее эластичной. Это свойство используют в некоторых технологических процессах для повышения эластичности изделий, производя быстрое охлаждение (закалку) расплава полимера.

Кристаллические полимеры образуют пространственные решетки кристаллитов. Кристаллические структуры являются дискретными, организованными, термодинамически стабильными. Кристаллизация происходит в определенном интервале температур.

Кристаллическую структуру могут образовывать полимеры со строго регулярным строением линейных цепей. При этом кристаллические полимеры имеют более высокие температуры плавления и механические свойства, чем аморфные.

В обычных условиях полной кристаллизации полимера не происходит и структура получается двухфазной, т. е. кристаллические полимеры имеют участки молекул разрыхленной упаковки, которые составляют его аморфную фазу. В зависимости от своей природы и условий затвердевания эти полимеры могут иметь структуру с преобладающим содержанием аморфной или кристаллической фазы.

Кристалличность сообщает полимеру большую жесткость и твердость, а также теплоустойчивость. Отношение объема всех кристаллических областей полимера к общему объему называется степенью кристалличности. Высокую степень кристалличности (60...80 %) имеют фторопласт, полипропилен, полиэтилен высокой плотности, поликарбонаты. Поливинилхлорид, полиэферы, полиамиды и полиэтилен низкой плотности имеют меньшую степень кристалличности. При длительном хранении, эксплуатации и переработке полимеров их структуры могут претерпевать изменения.

В зависимости от строения звена макромолекулы термопласты разделяют на *неполярные* и *полярные*. В случае симметричного строения звена макромолекулы полимер является неполярным, при несимметричном строении — полярным (рис. 3.2). При симметричном строении центры тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадают и молекула становится электрически нейтральной. При несимметричном строении в результате несовпадения центров тяжести положительных и отрицательных зарядов молекула обладает определенным дипольным моментом.

Неполярные полимерные материалы (фторопласт-4) не поглощают влагу и характеризуются стабильными свойствами. Неполярные полимеры (на основе углеводов) являются высококачественными высокочастотными диэлектриками и обладают хорошей морозостойкостью.

Полярные полимеры (поливинилхлорид) поглощают влагу и изменяют свои размеры и свойства. Полярность придает полимерам жесткость и теплоустойчивость, но морозостойкость у полярных материалов низкая.

Отвержденное состояние полимера называется термостабильным.

По способу синтеза полимеры подразделяются на получаемые *полимеризацией, поликонденсацией и химическим модифицированием*.

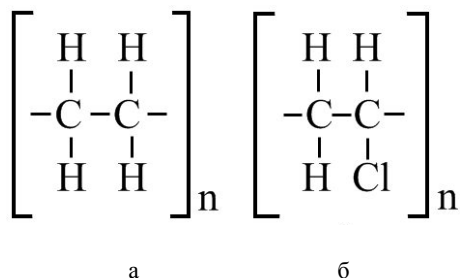


Рис. 3.2. Структура звена неполярного (а) и полярного (б) полимеров:
а — полиэтилен высокого давления; б — поливинилхлорид

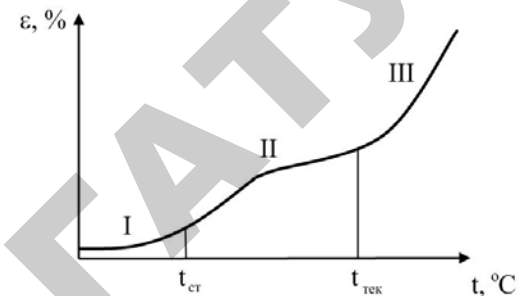


Рис. 3.3. Термомеханическая кривая аморфного полимерного материала:
I — зона стеклообразного состояния; II — зона высокоэластического состояния; III — зона вязкотекучего состояния; $t_{ст}$ — температура стеклования; $t_{тек}$ — температура текучести

3.1.2. Свойства полимеров

Особенности строения полимеров влияют на их физико-механические и химические свойства. Вследствие высокой молекулярной массы полимеры не могут переходить в парообразное состояние, поскольку давление паров полимеров незначительно и при нагреве выше определенной температуры они разлагаются.

Полимеры могут находиться в четырех физических состояниях: кристаллическом, стеклообразном, высокоэластичном и вязкотекучем.

Следует отметить, что при определении физико-механических свойств полимеров их полидисперсность приводит к значительному разбросу показателей. Физико-механические свойства полимеров зависят от их структуры и физического состояния, которое в зависимости от температуры может быть стеклообразным, высокоэластичным и вязкотекучим. Все три состояния можно наблюдать у образца аморфного термопласта (винипласта), если подвергнуть его нагреву, периодически нагружать сжимающей нагрузкой, соблюдая постоянство нагрузки и времени ее воздействия на образец при различной температуре, и измерять его деформацию. В результате данного опыта можно получить термомеханическую кривую, отражающую зависимость деформации образца от температуры его нагрева (рис. 3.3).

В стеклообразном состоянии полимерный материал сопротивляется воздействию температуры, а его деформация является, в основном, упругой, т. е. после снятия нагрузки деформация быстро исчезает. При этом атомы, входящие в состав молекулярной цепи, совершают колебательное движение около положения равновесия, т. е. движения звеньев и перемещения макромолекул не происходит.

В высокоэластическом состоянии наблюдается значительная деформация полимерного материала, которая после снятия нагрузки исчезает за некоторое время. Такая деформация называется высокоэластической или условно остаточной. Высокоэластичное состояние полимера наступает при его нагреве выше температур стеклования. Высокоэластическое состояние присуще только высокополимерам и характеризуется способностью материала к большим обратным изменениям формы при небольших нагрузках (звенья колеблются и макромолекула приобретает способность изгибаться).

В вязкотекучем состоянии полимера наблюдается остаточная деформация. При этом происходит перемещение макромолекул относительно друг друга. Вязкотекучее состояние напоминает жидкое состояние, но отличается от него очень большой вязкостью (подвижна вся макромолекула).

С изменением температуры линейный или разветвленный полимер может переходить из одного физического состояния в другое.

Примером стеклообразного состояния полимера при температуре 20 °С может служить полистирол (материал, из которого изготавливают большое количество корпусных деталей радиотехнического назначения), высокоэластического состояния — каучук, вязкотекучего — полиизобутилен.

У кристаллических термопластов переход в вязкотекучее состояние может происходить, минуя высокоэластическое состояние. Полимеры с сетчатой структурой находятся, в основном, в стеклообразном состоянии, поскольку вязкотекучее состояние для них невозможно, а высокоэластическое затруднено.

В машиностроении полимеры используются, как правило, в стеклообразном и высокоэластическом состояниях. Переработка полимеров в изделия осуществляется в вязкотекучем состоянии (реже — в высокоэластическом состоянии).

В процессе эксплуатации деталей важно знать особенности протекания релаксационных процессов. Всякий релаксационный процесс заключается в стремлении системы к восстановлению нарушенного равновесия в результате теплового движения молекул. Если при нормальной температуре растянуть в пределах упругости стальной образец, а затем снять нагрузку, то деформация образца исчезнет практически сразу. При снятии нагрузки у растянутого образца из мягкой резины деформация не исчезнет за длительный период времени (месяцы, годы). Таким образом, для низкомолекулярных веществ, например металлов, релаксационные процессы в пределах жаропрочности протекают за миллионные доли секунды. Для полимерных материалов релаксационные процессы «растянуты» во времени, что связано с наличием длинных и запутанных макромолекул, которые не успевают отреагировать на снятие или приложение нагрузки. Эта специфика протекания релаксационных процессов влияет на поведение полимеров под нагрузкой, что имеет важное практическое значение в инженерной практике.

Для прогнозирования эксплуатационных характеристик деталей из полимерных материалов необходимо учитывать такие явления, как ползучесть, упругое последействие, релаксация напряжения, механический гистерезис. Если приложить к образцу полимера достаточно большую нагрузку, то постепенно в нем будет развиваться деформация, которая, в общем случае, складывается из упругой деформации, а также высокоэластической и остаточной (рис. 3.4).

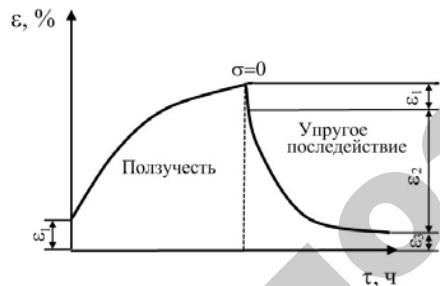


Рис. 3.4. Зависимость деформации полимера от времени при действии постоянного достаточно большого напряжения (ползучесть) и после снятия нагрузки (упругое последействие): ϵ_1 — упругая деформация; ϵ_2 — высокоэластическая деформация; ϵ_3 — остаточная деформация; σ — напряжение

Явление ползучести полимерных материалов под действием постоянной нагрузки необходимо учитывать при прогнозировании эксплуатационных свойств полимеров. С повышением температуры среды ползучесть полимеров увеличивается, поскольку облегчаются условия распрямления макромолекул, а при снижении уровня нагрузки ползучесть уменьшается. Упругое последействие (рис. 3.4) вызывает изменение линейных размеров деталей, изготовленных из полимеров методом литья под давлением.

Если прекратить деформирование растянутого на разрывной машине образца полимера и следить за стрелкой силоизмерителя, то можно видеть, как постепенно стрелка вернется к делению «ноль». Это свидетельствует о том, что напряжение в образце исчезло, и произошла релаксация напряжения (рис. 3.5). На практике релаксация напряжения проявляется, например, в виде ослабления пружин.

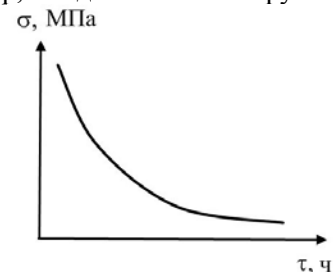


Рис. 3.5. Падение напряжения в деформированном образце полимера с течением времени после прекращения процесса деформации (релаксация напряжения)

Механический гистерезис имеет место, например, при многократном растяжении образца или детали (рис. 3.6).

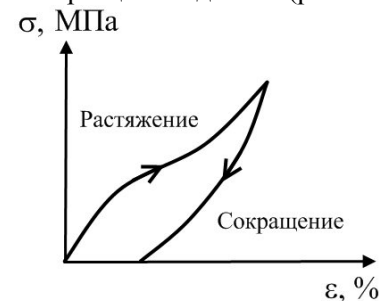


Рис. 3.6. Кривые растяжения и сокращения полимерного образца (механический гистерезис)

При этом кривая разгрузки не совпадает с кривой нагрузки. Это явление используется в устройствах для гашения вибрации.

Под старением полимерных материалов понимается самопроизвольное необратимое изменение их важнейших технических характеристик, происходящее в результате сложных химических и физических процессов, развивающихся в материале при эксплуатации и хранении. Причинами старения являются свет, теплота, а также кислород, озон и другие немеханические факторы. Старение ускоряется при многократных деформациях; менее существенно на старение влияет влага. Различают старение тепловое, световое, озонное и атмосферное.

Для замедления процессов старения в полимерные материалы добавляются стабилизаторы (различные органические вещества) и антиоксиданты (амины, фенолы и др.). Длительность эксплуатации стабилизированных материалов значительно возрастает. Срок наступления хрупкости полиэтилена, стабилизированного сажой, составляет свыше 5 лет. Трубы из поливинилхлорида могут эксплуатироваться 10...25 лет.

К важным свойствам полимеров относится также их радиационная стойкость. Под действием ионизирующих излучений в полимерах происходят ионизация и возбуждение, которые сопровождаются разрывом химической связи и образованием свободных радикалов. Наиболее устойчивы к радиации полимеры, имеющие бензольное кольцо в виде боковой группы (полистирол).

Вакуум действует на полимерные материалы по-разному. Ухудшение их свойств связано с выделением из материала различных добавок (пластификаторов, стабилизаторов) и протеканием процессов деструкции. Ориентированные полимеры (полиамиды, полиэтилен, полипропилен) имеют одинаковую долговечность в вакууме и на воздухе.

Абляционная стойкость (абляция — унос некоторой массы вещества с поверхности твердого тела обтекающим эту поверхность потоком горячих газов) определяется устойчивостью материала к механической, термической и термоокислительной деструкции. На абляционную стойкость полимера влияет также его структура. Материалы на основе полимеров линейного строения имеют низкую стойкость (происходит деполимеризация и деструкция). Температура абляции не превышает 900 °С. Материалы на основе тер-

мостойких полимеров лестничного или сетчатого строения (фенолоформальдегидные, кремнийорганические и др.) имеют более высокую стойкость к абляции. В них протекают процессы структурирования и обезуглероживания (карбонизации). Температура абляции может достигать 3000 °С.

Для увеличения абляционной стойкости в полимеры вводят армирующие наполнители (например, стеклянные волокна). Стеклянные волокна оплавляются. При этом расходуется много теплоты. Теплопроводность пластиков в сотни раз меньше, чем теплопроводность металлов, поэтому при кратковременном действии высокой температуры внутренние слои материала нагреваются до 200...350 °С и сохраняют механическую прочность.

Механическая прочность, эластичность, электроизоляционные и другие технические свойства полимеров обуславливают их широкое применение. Полимеры служат основой пластмасс, химических волокон, резины, лакокрасочных материалов, клеев, герметиков, ионообменных смол. Природные биополимеры составляют основу всех живых организмов и участвуют практически во всех процессах жизнедеятельности.

В технике полимеры редко используют в чистом виде. Наиболее широкое применение они находят в виде пластмасс, в состав которых, кроме основного компонента (полимера, играющего роль связующего вещества), вводят различные добавки, оказывающие определенное влияние на свойства пластмасс.

3.2. ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ (ПЛАСТМАССЫ, ПЛАСТИКИ)

Пластмассы — материалы на основе природных или синтетических полимеров, способные под влиянием нагревания и давления формироваться в изделия сложной конфигурации и устойчиво сохранять приданную им форму.

Пластические массы относятся к полимерным высокомолекулярным синтетическим материалам. Их (как и металл) можно сваривать, прессовать и прокатывать. Кроме того, из них отливают детали самой сложной формы.

3.2.1. Состав, классификация, свойства и применение пластмасс

Пластмассы разделяют на *простые* и *сложные*. *Простые пластмассы* представляют собой чистые полимеры (полиэтилен, органические стекла и др.). *Сложные пластмассы* состоят из полимера, наполнителя, отвердителя, пластификатора, красителя и смазывающих добавок. Некоторые из перечисленных компонентов в отдельных видах пластмасс могут отсутствовать.

Полимер — основной элемент пластмассы, выполняющий роль связующего вещества. Характерной чертой полимеров является пластичность (способность материала принимать придаваемую ему форму под воздействием тепла и давления и устойчиво ее сохранять).

Наполнитель вводят с целью снижения стоимости материала и обеспечения ему заданных свойств (в первую очередь, прочностных). К наиболее распространенным наполнителям относятся древесная или минеральная мука (порошковые наполнители). Для получения особо прочных пластмасс в качестве наполнителя используют хлопчатобумажные и стеклянные ткани, бумагу или древесный шпон (тонкий лист дресины). Такие пластмассы называют слоистыми пластиками.

Пластификатор используют для повышения пластичности пластмасс. В качестве пластификаторов применяют эфиры многоатомных спиртов и многоосновных кислот.

Отвердитель (ингибитор) применяется для ускорения перехода терморезактивных смол в неплавкое состояние или в твердое состояние термoplastических смол.

Смазывающие добавки повышают текучесть материала при переработке и предупреждают прилипание изделия к формoобразующей оснастке.

Антистарители (антиокислители) используют для замедления процесса окисления пластмасс (особенно при повышенной температуре и воздействии света).

Красители служат для придания пластмассам требуемого декоративного вида, а также для уменьшения влаго- и светопоглощения.

Кроме того, в пластмассы вводят *стабилизаторы*, которые связывают низкомолекулярные продукты разложения полимеров, ускорители или замедлители процесса отверждения пластмасс.

В зависимости от химической природы полимеров пластические массы разделяют на четыре класса.

1. *Класс А*. Пластические массы на основе высокомолекулярных соединений, получаемых цепной полимеризацией: полиэтилен ВД, полиэтилен НД, пропилен, винипласт и пластикаты на основе поливинилхлорида; полиизобутилен; фторопласты; полистирол и его сополимеры; этинопласты (поливинилбутироль и др.); акрилопласты и др.

2. *Класс Б*. Пластические массы на основе полимеров, получаемых поликонденсацией и ступенчатой полимеризацией: фенопласты с различными наполнителями (пресс-порошки, волокниты, текстолиты, стекловолокниты, фаолит и другие); аминопласты; мелалит; эфиропласты; полиамиды (капрон и другие); уретанопласты; эпоксипласты и др.

3. *Класс В*. Пластические массы на основе химически модифицированных природных полимеров. К ним относятся пластические массы на основе производных целлюлозы (целлулоид, этролы), галолит.

4. *Класс Г*. Пластические массы на основе природных и нефтяных асфальтов и смол (битумопласты с различными наполнителями).

По виду основного вещества, т. е. его свойств при нагреве, все пластмассы подразделяют на термoplastические (термопласты) и терморезактивные (реактопласты). **Термопласты** отличаются высокой технологичностью и небольшой усадкой при формовке, обладают большой упругостью и не склонны к хрупкому разрушению. Детали из них преимущественно изготавливаются без наполнителя. **Терморезактивные пластмассы** хрупкие и дают большую осадку, поэтому использование наполнителя при изготовлении из них деталей предпочтительно.

3.2.2. Термoplastические пластмассы

Термопласты делят на *неполярные* и *полярные*. К первым относятся полиэтилен, полипропилен, полистирол и фторопласт-4, ко вторым — органическое стекло, фторопласт-3, поливинилхлорид, полиамиды, полиуретаны, поликарбонаты, полиформальдегид и др.

Полиэтилен в зависимости от способа полимеризации и достигнутой плотности подразделяют на полиэтилен низкой и полиэтилен высокой плотности, отличающиеся молекулярной массой и степенью кристалличности. Чем выше плотность и кристалличность полиэтилена, тем выше его прочность и теплостойкость. По-

лиэтилен химически стоек и из него изготавливают кислотостойкие трубы, краны, пленки и различную арматуру. Он обладает высокими диэлектрическими свойствами и служит в качестве защитных покрытий от коррозии и тока на металлических изделиях.

Полипропилен обладает высокими физико-механическими свойствами, по которым он превосходит полиэтилен. Полипропилен является сырьем для получения эластичных и устойчивых к кислотам и щелочам волокон. Из пропилена изготавливают пленки, трубы, детали холодильников, мотоциклов и автомобилей. Главным его недостатком является невысокая морозостойкость (до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Из *полистирола* получают нити, пленочные материалы, различные легко нагруженные фасонные изделия. Из-за исключительно высоких диэлектрических свойств его широко используют в радиотехнике и электронике. Среди термопластов полистирол наиболее стоек к воздействию ионизирующего излучения. Недостатками полистирола являются невысокая теплостойкость и склонность к трещинообразованию.

Фторопластами называют фторсодержащие полимеры (кроме фторкаучука).

Фторопласт-4 является аморфно-кристаллическим полимером. Он относительно мягок, но охрупчивается при очень низких температурах (до $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$) и не растворяется в кислотах и щелочах. Фторопласт имеет низкий коэффициент трения и по этой причине широко используется при изготовлении подшипников. Из фторопласта-4 делают уплотнительные элементы и химически стойкие детали (трубы, краны, вентили, мембраны и т. д.). Недостатками этого полимера являются токсичность и трудность переработки.

Фторопласт-3 уступает по химической стойкости фторопласту-4, но превосходит по этому показателю другие полимеры. Фторопласт-3 применяют для изготовления деталей насосов, счетчиков, клапанов, а также для изготовления мембран и диафрагм. Изделия из фторопласта-3 могут работать без изменения свойств только при температурах не выше $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Органическое стекло — это прозрачный аморфный термопласт. Оно пропускает ультрафиолетовое излучение, отличается высокой стойкостью в атмосфере и не подвергается действию разбавленных кислот и щелочей. Органическое стекло применяется в самолетостроении и автомобилестроении, а также в оптической промышленности.

Из чистой поливинилхлоридной смолы со стабилизаторами получают *винипласт* который является аморфным полимером. Для винипласта характерна повышенная жесткость и высокая механическая прочность. Он хорошо обрабатывается, сваривается и склеивается. Этот материал не поддерживает горение, химически стоек. Из винипласта изготавливают детали запорной арматуры, используемой в химической промышленности, и элементы крупных вентиляционных систем в помещениях с агрессивной средой. Кроме винипласта из поливинилхлорида получают поливинилхлоридовый пластикат, который, в основном, используется для получения бытовых изделий и в качестве заменителя кожи.

Полиамиды обладают хорошей жидкотекучестью, высокой стойкостью против истирания, низким коэффициентом трения и легко поддаются механической обработке. Наиболее известными пластмассами этой группы являются *капрон* и *нейлон*. Из капрона изготавливают детали, используемые в узлах трения, а также втулки, подшипники, шестерни зубчатых передач, которые отличаются масло- и бензиностойкостью. Капрон применяется в авиа- и судостроении. Капроновые волокна используются при изготовлении сетей, строп и т. п. Нейлон обладает более высокой теплостойкостью и износостойкостью, чем капрон и используется для производства синтетических волокон.

Свойства *полиуретанов* близки к свойствам полиамидов. Уступая полиаидам по прочности и теплостойкости, полиуретаны превосходят их по электроизоляционным свойствам и химической стойкости.

Поликарбонат сохраняет высокую ударную вязкость при повышенных и отрицательных (до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах, что обуславливает его использование в качестве конструкционного материала для небольших деталей. Из него изготавливают подшипники, шестерни, медицинское оборудование, радиодетали.

Полиформальдегид относится к линейным полимерам. Его отличает жесткость, твердость, высокие ударная вязкость и упругость, низкий коэффициент трения по стали. Полимер может работать при температурах от $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из полиформальдегида изготавливают подшипники, шестерни, детали вентиляторов, бытовых машин, автомобилей и т. д.

Механические свойства некоторых термопластов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Свойства термопластичных пластмасс

Материал	σ_b , МПа	δ , %	Ударная вязкость*, кДж/м ²	Максимальная температура эксплуатации (без нагрузки), °С
Полиэтилен				
низкой плотности (<0,94 т/м ³);	10...18	300...1000	Не ломается	60...75
высокой плотности (>0,94 т/м ³)	18...32	100...600	5...20	70...80
1	2	3	4	5
Полипропилен	26...38	700...800	3...15	100
Полистирол	40...60	3...4	2	50...70
АБС (ацетобутиратстирол)	30...55	15...30	8...40	75...85
Поливинилхлорид				
жесткий;	50...65	20...50	2...4	65...85
пластикат	10...40	50...350	Не ломается	50...55
Фторопласт-4	20...40	250...500	16	250
Фторопласт-3	37	160...190	8...10	150
Органическое стекло	80	5...6	2	65...90
Поликарбонат				
без наполнителя;	60...65	80...120	20...30	135
с 30 % волокна	90	3,5	8	145
Капрон				
сухой	75...85	50...130	3...10	80...100
насыщенный водой	35...50	160...250	> 45	–
сухой + 30 % волокна	180	3	12	100...130
насыщенный водой + 30 % волокна	100...125	4	18	–
Эпоксидный пластик	60	4	> 1,8	–
То же + 65 % стеклянной ткани (для сравнения)	500	2,5		130

*ГОСТ 4647—80

3.2.3. Термореактивные пластмассы

В термореактивных пластмассах связующим веществом служат *термореактивные смолы* (фенолоформальдегидные, эпоксидные и кремнийорганические).

Термореактивные пластмассы классифицируют с учетом структурного состояния используемого наполнителя на порошковые, волокнистые и листовые.

В качестве порошковых наполнителей используются древесная мука и порошки минерального происхождения (графит, кварц, слюда, асбест). Однородное распределение порошка в связующей массе обеспечивает высокую степень изотропности структуры и механических свойств порошковых пластмасс. Однако их показатели прочности и пластичности достаточно низкие (временное сопротивление 30 МПа, предел прочности при изгибе 60 МПа, ударная вязкость 4...6 кДж/м²).

Пластмассы с минеральными наполнителями обладают химической стойкостью и повышенными электроизоляционными свойствами.

Материалы на эпоксидной основе используются для «залечивания» отливок и восстановления изношенных деталей; а также при изготовлении инструментальной и литейной оснастки.

Пластмассы с волокнистыми наполнителями обладают анизотропией механических свойств. Степень анизотропности определяет длина волокон наполнителя. В зависимости от природы наполнителя различают следующие виды пластмасс: волокниты, асбоволокниты и стекловолокниты. В качестве наполнителя фенолформальдегидных смол соответственно используются очесы хлопка, волокна асбеста и стекловолокно. Волокнистые пластмассы (особенно стекловолокниты), отличаются повышенными теплостойкостью (до 280 °С) и ударной вязкостью (25...150 кДж/м²). Волокниты применяют для изготовления фланцев, шкивов, втулок. Асбоволокниты используются в качестве фрикционных материалов в тормозных системах. Из стекловолокнитов изготавливают детали с резбой и электротехнические силовые элементы.

К слоистым пластмассам относятся текстолит, гетинакс, асботекстолит, стеклотекстолит и древесно-слоистый пластик (ДСП). В *текстолите* наполнителем служит хлопчатобумажная ткань. Текстолиты хорошо гасят вибрации и не раскалываются. В этой связи текстолиты являются отличным материалом для изготовления слабонагруженных подшипни-

1	2	3	4	5
Волокниты	30...60	1...3	—	120...140
Гетинаксы	60...70	—	4...5	125
Текстолиты	65...100	1...3	20...35	90...105
Стеклотекстолиты	200...600	1...3	50...200	200...400
Пористые пластмассы	0,5...2,5	—	Около 1	—
*ГОСТ 4647—80.				

ков и зубчатых колес. В *гетинаксе* наполнителем служит бумага. Гетинакс используют в качестве электротехнического и декоративного (облицовочного) материала. *Асботекстолит* на кремнийорганическом связующем отличается высокими теплозащитными и теплоизоляционными свойствами. Свойства *стеклотекстолитов* зависят от природы связующего. *Фенолоформальдегидные смолы*, обеспечивают повышенную теплостойкость и лучшие электроизоляционные свойства.

Все большее применение в народном хозяйстве находят кремнийорганические полимеры (силиконы). Важнейшими свойствами применяемых кремнийорганических полимеров являются высокая термическая стойкость, стойкость к воздействию окислительных и агрессивных сред, высокие диэлектрические характеристики. На основе силиконов разработаны клеи, герметики, лаки, эмали, конструкционные материалы, смазки. Для повышения адгезионных свойств лаков и эмалей в состав кремнийорганических смол вводят эпоксидные, полиэфирные и фенольные смолы. Кремнийорганические полимеры применяются в электротехнической промышленности, машиностроении и авиастроении. Кремнийорганические каучуки используются для получения морозостойких и теплостойких резин.

Древеснослоистые пластики с наполнителем из листов древесного шпона имеют хорошие механические свойства и низкий коэффициент трения.

Механические свойства реактопластов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Свойства термореактивных пластмасс

Материал	σ_b , МПа	δ , %	Ударная вязкость*, кДж/м ²	Максимальная температура эксплуатации (без нагрузки), °С
1	2	3	4	5
Термореактивные полимеры без наполнителей				
фенолоформальдегидные	15...35	1...5	Менее 1	200
полиэфирные	42...70	2	Менее 1	95...120
эпоксидные	28...70	3...6	Менее 1	150...175
кремнийорганические	22...42	5...10	0,5...5	350
Порошковые пластмассы	30...60	1...3	10...20	100...200

3.3. РЕЗИНОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Резина — продукт переработки каучуков, которые являются полимерами на основе изопреновых групп. Резинотехнические изделия широко используются в машиностроении. Так, резиновые кольца круглого сечения и манжеты применяют для уплотнения подвижных и неподвижных соединений в гидравлических, пневматических, топливных и смазочных устройствах; резинометаллические манжеты — для уплотнения валов; амортизаторы — для уменьшения динамических нагрузок в автомобилях, троллейбусах, тракторах, локомотивах; резиновые прокладки — для обеспечения герметичности соединений; конвейерные ленты, рукава и трубки — для перемещения материалов; клиноременные и плоские ремни — для передачи вращения; резиновые втулки — для эластичного соединения узлов машин; различные профили, шнуры, трубки — для уплотнения окон и дверей транспортных средств и т. д.

Натуральный каучук (НК) является продуктом коагуляции млечного сока (латекса) растений (в основном, рода гевей). По химическому строению НК является продуктом полимеризации изопреновых групп с молекулярной массой от 70 000 до 2 500 000 а.е.м. и плотностью 910...920 кг/м³.

Структура макромолекул НК, в основном, линейная, а сегменты этих молекул ориентированы под различными углами к оси макромолекул. Поэтому возникновение механических напряжений в объеме НК сопровождается конформационными изменениями в молекулярной структуре. Зигзагообразность макромолекул и действие сил межмолекулярного взаимодействия обуславливают высокую эластичность натурального каучука. Он растворяется в жирных

и ароматических растворителях (бензине, бензоле, хлороформе, сероуглероде и др.), образуя вязкие растворы, применяемые в качестве клеев. При нагреве выше температуры 80...100 °С каучук становится пластичным и при температуре 200 °С начинает разлагаться. Температура стеклования лежит в интервале от –40 до –70 °С. Обычно НК аморфен. Однако при длительном хранении каучука возможна его кристаллизация. Кристаллическая фаза возникает также при растяжении каучука, что значительно увеличивает его прочность. Наличие неопределенных связей в молекулах делает возможным при определенных условиях их сшивку посредством специальных агентов и перевод каучука в термостабильное состояние.

Синтетический каучук (СК) представляет собой продукт полимеризации однородных или разнородных мономеров углеводородного, нитрильного, сульфидного, силоксанового и других типов. Молекулы синтетических каучуков отличаются от молекул натуральных каучуков большей степенью разветвленности, а сочетания различных звеньев при полимеризации позволяют получать большое разнообразие сополимеров с большим набором физико-механических и специальных свойств.

Основными видами СК, имеющими наиболее важное практическое значение, являются бутадиеновые и бутадиен-стирольные, относимые к группе СК общего назначения, а также хлоропеновые, кремнийорганические, полиуретановые и каучуки других видов, относящиеся к СК специального назначения. Главное назначение практически всех каучуков — переработка в резинотехнические материалы.

Основным процессом переработки каучука в резину является его вулканизация.

Резина как технический материал отличается от других материалов высокими эластичными свойствами, которые присущи ее главному исходному компоненту — каучуку. Она способна к очень большим деформациям (относительное удлинение достигает 1000 %), которые почти полностью обратимы. При нормальной температуре резина находится в высокоэластическом состоянии и ее эластичные свойства сохраняются в широком диапазоне температур.

Модуль упругости резины лежит в пределах 1...10 МПа, т. е. в тысячи и десятки тысяч раз меньше, чем для других материалов. Особенностью резины является ее малая сжимаемость (при инже-

нерных расчетах резину считают несжимаемой), а коэффициент Пуассона составляет 0,4...0,5, тогда как для металла его значение составляет 0,25...0,30. Другой особенностью резины как технического материала является релаксационный характер деформации. При нормальной температуре время релаксации может составлять 10^{-4} с и более. При работе резины в условиях многократных механических напряжений часть энергии, воспринимаемой изделием, теряется на внутреннее трение (в самом каучуке и между молекулами каучука и частицами добавок); это трение преобразуется в теплоту и является причиной гистерезисных потерь. При эксплуатации толстостенных деталей (например, шин) вследствие низкой теплопроводности материала увеличение температуры в массе резины снижает ее работоспособность.

Кроме отмеченных особенностей, для резиновых материалов характерны высокая стойкость к истиранию, газо- и водонепроницаемость, химическая стойкость, хорошие электроизолирующие свойства и небольшая плотность.

Вулканизация является процессом сшивки макромолекул каучука при нагреве под действием специальных вулканизирующих агентов в пространственно-сетчатую структуру. При увеличении степени вулканизации изменяются физико-механические и электрические свойства резины, а также ее набухаемость и газопроницаемость. Например, с увеличением степени вулканизации твердость резины монотонно повышается, разрушающее напряжение при растяжении сначала увеличивается, а затем снижается и т. д.

Основным вулканизирующим агентом для большинства каучуков является сера, образующая поперечные связи между макромолекулами. От содержания серы существенно зависят механические свойства получаемого при вулканизации продукта (вулканизата). Если массовая доля серы составляет 0,5...5 %, то частота молекулярной сетки невысока и вулканизат имеет высокую эластичность (мягкая резина). При большем содержании серы повышается твердость резины (полуэбонит), а при массовой доле серы 30...50 % получается твердый материал, называемый эбонитом. В качестве других вулканизирующих агентов используют селен, оксиды металлов и другие вещества. В частности, каучуки, синтезированные на основе диенов, вулканизируются органическими перекисями, действием ионизирующей радиации (радиационная вулканизация) и ультрафиолетовых лучей (фотовулкани-

зация). Бутадиеновые и бутадиен-стирольные каучуки могут вулканизоваться при нагревании до температуры 190...200 °С в отсутствие вулканизирующих агентов (термовулканизация).

Для сокращения продолжительности вулканизации и повышения физико-механических свойств резины используют ускорители вулканизации. Ускорители повышают реакционную способность вулканизирующих веществ и влияют на характер поперечных связей между макромолекулами. Эффективность действия ускорителей усиливается в присутствии активаторов вулканизации. В качестве ускорителей вулканизации используют специальные химические соединения (тиазолы и др.), в качестве активаторов — оксиды двухвалентных металлов (цинк, магний, кальций, кадмий) и другие химические соединения.

Наполнителями резин являются высокодисперсные неорганические или органические вещества, содержание которых в смеси составляет 10...25 %. Наполнители изменяют механические характеристики резины, придают им некоторые специфические свойства, облегчают переработку и снижают стоимость изделий. Наполнители, улучшающие механические характеристики резин, называются активными, а наполнители, не изменяющие свойства резин или ухудшающие их в ряде случаев, — инертными. Активными наполнителями является сажа, синтетический диоксид кремния, силикаты металлов и др. Например, введение сажи в смесь на основе бутадиен-стирольного каучука повышает прочность вулканизата при растяжении в 10 раз. К инертным наполнителям относятся мел, каолин и др.

Введение пластификаторов (2...10 %) в каучуки облегчает их переработку, повышает пластичность резиновых смесей, способствует уменьшению разогрева при смешении смеси. В качестве пластификаторов используют нефтяные масла, парафины, нефтеполимерные смолы, канифоль, сосновую смолу и др.

В качестве стабилизаторов используют, главным образом, антиоксиданты (специальные химические соединения, повышающие устойчивость смесей к окисляющему действию кислорода).

Красители (минеральные или органические) вводят для окраски резины. Красители могут составлять до 10 % массы каучука. Некоторые красящие вещества (белые, желтые, зеленые) поглощают коротковолновую часть солнечного спектра и этим защищают резину от светового старения.

Часто в состав резиновой смеси вводят регенерат (продукт переработки старых резиновых изделий и отходов резинового производства). Кроме снижения стоимости резины, регенерат повышает ее качество, снижая склонность к старению.

По назначению резины ее разделяют на следующие основные группы:

- 1) резины общего назначения, применяемые при температурах от -50 до +150 °С;
- 2) теплостойкие резины, способные длительно эксплуатироваться при температуре 150...200 °С (до 316 °С);
- 3) морозостойкие резины, пригодные для длительной эксплуатации при температурах ниже -50 °С;
- 4) масло- и бензиностойкие резины;
- 5) резины, стойкие к действию различных химических сред (кислоты, щелочи и др.) в том числе теплостойкие (выдерживающие температуры до 310 °С);
- 6) электропроводящие резины;
- 7) диэлектрические резины, используемые, главным образом, для изоляции кабелей;
- 8) радиационно-стойкие резины.

Помимо названных, различают также вакуумные, вибро-, водо-, огне-, светостойкие, оптически активные, фрикционные, медицинские, пищевые и другие виды резин.

3.3.1. Технология изготовления резиновых изделий

Технологический процесс изготовления резинотехнических изделий включает в себя три стадии: получение резиновой смеси, формование полуфабрикатов, вулканизация.

Резиновые смеси готовят в смесителях или на вальцах. Операция приготовления резиновой смеси заключается в перемешивании составляющих (каучука, вулканизатора, ускорителя, активатора, наполнителя, пластификатора, стабилизатора) для равномерного распределения их в смеси. При перемешивании в смесителе исходные компоненты загружают в камеру смесителя, снабженную специальными мешалками, которые обеспечивают равномерное смешивание компонентов. Полученную смесь подают на листовальные валки. Через 2...3 минуты образовавшуюся на переднем валке уплотненную смесь срезают в виде небольших пластин толщиной 8...10 мм.

При приготовлении резиновой смеси на вальцах, представляющих собой два валька, вращающиеся навстречу друг другу с различной частотой, каучук равномерно распределяют по поверхности валька, и на вальцы подают различные компоненты. Компоненты перетираются на поверхности валька и перемешиваются. При этом зазор между вальками постепенно увеличивают. Последовательность введения компонентов зависит от типа каучука, состава резиновой смеси и свойств отдельных ингредиентов. Образовавшуюся на переднем вальке резиновую смесь надрезают и снимают в виде небольших пластин.

Для формования полуфабрикатов в виде бесконечных листов, прорезиненных тканей используют каландрование. Каландр представляет собой систему валков, образующих два или три зазора, через которые пропускается резиновая смесь и соответствующая ткань (хлопчатобумажная, льняная, шелковая).

Для формования полуфабрикатов в виде шнуров, трубок, специальных профилей используют экструзию (шприцевание). Процесс аналогичен ранее описанному методу переработки термопластов.

Сырая листовая резина, прорезиненная ткань, профильные полуфабрикаты становятся изделиями после процесса вулканизации. Вулканизацию проводят нагреванием исходного материала при повышенном или атмосферном давлении. Как правило, температура составляет 140...170 °С, в отдельных случаях она повышается до 190...200 °С. Время вулканизации определяют экспериментальным путем. Оно зависит от толщины и формы изделия, теплофизических и других свойств смеси. Чаще всего вулканизацию проводят под давлением 1,5...2 МПа для предотвращения пористости. Для горячей вулканизации используют вулканизационные котлы с различными теплоносителями, вулканизационные прессы, форматоры-вулканизаторы (для автопокрышек), ротационные вулканизаторы (для клиновых ремней). Иногда применяют холодную вулканизацию погружением изделия при комнатной температуре в раствор S_2Cl_2 в сероуглероде. Для обкладок кабелей используют радиационную вулканизацию путем облучения изделий пучком быстрых электронов.

Для получения изделий типа кольцевых, манжетных уплотнений, втулок используют прессование и литье под давлением. При этом процессы формования и вулканизации происходят одновременно.

Прессование резиновых смесей осуществляют в пресс-формах откры-

того типа. Температура прессования обычно составляет 140...150 °С, продолжительность — 20...40 мин, давление — 1,5...2 МПа. Данный способ применим для толстостенных изделий при их серийном производстве.

Следует отметить, что для литья под давлением могут использоваться резиновые смеси с определенной вязкостью. Наилучшей литьевой способностью при этом обладают резиновые смеси на основе изопреновых каучуков.

3.4. ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ПЛАСТМАССЫ

Легкие и сверхлегкие *газонаполненные пластмассы* представляют собой особый класс материалов, состоящих из фаз (твердой и газообразной). Пенопласты (вспененные пластмассы, газонаполненные полимеры) содержат в твердой полимерной матрице замкнутые или сообщающиеся газонаполненные ячейки. Пенопласты с сообщающимися ячейками (порами) иногда называются поропластами. Горючесть, теплостойкость и химическая стойкость таких материалов определяются, главным образом, типом полимера. Теплоизоляционные и электрические свойства, водо- и влагопоглощение определяются морфологией макроструктуры. Пенопласты делят на эластичные, жесткие и полужесткие; в отдельную группу выделяют интегральные пенопласты, которые имеют на поверхности монолитную корку. Для получения большинства пенопластов композицию на основе полимера (олигомера) смешивают с вспенивающим агентом (например, твердым газообразователем, легкокипящей жидкостью или инертным газом) либо с полым наполнителем. В некоторых случаях вспенивание происходит в результате химического взаимодействия компонентов, сопровождающегося выделением газа. Форму вспененной композиции фиксируют отверждением или охлаждением. Практическое применение нашли *пенополиуретаны, пенополистирол, пенополивинилхлорид, пенополиолефины, пенофенопласты, пеноаминопласты, реноэпоксиды*.

Конструкции из *пенополивинилхлорида* бывают жесткие и эластичные. Жесткие конструкции применяются как звукоизоляционные и теплоизоляционные материалы в строительстве, из них изготавливают плавсредства (плотики, буйки и др.). Эластичные виды пе-

нополивинилхлорида используют для изготовления амортизаторов, звукоизолирующих прокладок, виброзащитных устройств и т. п.

Пенополиолефины получают на основе линейного полиэтилена. Они подразделяются на высоко вспененные и подвспененные. Эти материалы горючи (температура их эксплуатации находится в пределах от -60 до $+60...80$ °С). Получают такие материалы (главным образом, в виде листов, пленок, труб и т. п.) экструзией или литьем под давлением и применяют для электроизоляции проводов и коаксиальных кабелей, изготовления плавучих и спасательных средств, легкой тары и упаковки, фильтров для тонкой очистки жидкостей и др.

Пенополистирол имеет закрытые поры, он влагонепроницаем и применяется для теплоизоляции и звукоизоляции в строительстве; а также как упаковочный материал для транспортировки приборов, пищевых продуктов; для изоляции кабелей, трубопроводов и др.

Пенополиуретан (поролон) бывает эластичный и жесткий. В эластичных пенополиуретанах преобладают открытые поры и они применяются в производстве мягкой мебели, матрацев, подушек, губок, воздушных фильтров, амортизационных прокладок, игрушек. У ретикулированных полиуретанов объем газовой фазы достигает 97 % (в результате дополнительного вскрытия ячеек, например, химической обработкой).

Жесткие пенополиуретаны имеют замкнутые ячейки и, как следствие, хорошие теплоизоляционные свойства. Жесткие пенополиуретаны применяются как теплоизоляционные и электроизоляционные материалы в строительстве, машиностроении, холодильной технике и радиотехнике. Интегральные типы используются как декоративные конструкционные материалы в приборостроении и в бытовых машинах (взамен дерева и металлов).

Пеноэпоксиды, получают на основе жидких эпоксидных смол (обычно диановых). Жесткие пенопласты, главным образом, с замкнутыми ячейками получают вспениванием с последующим отверждением и применяются для электроизоляции в приборостроении и радиотехнике, а также для изготовления поплавков и расходомеров в авиационных топливных баках.

Пенофенопласты получают на основе фенолоформальдегидных смол. Жесткие пенопласты обычно имеют открытые ячейки и теплоустойчивость $130...150$ °С. Эти материалы производят в виде плит

(блоков) в стационарных условиях или непосредственно перед использованием заливкой или напылением жидких смесей. Эти смеси содержат:

- 1) резольную смолу (иногда ее смесь с новолачной),
- 2) вспенивающий агент (фреон, алюминиевая пудра, петролейный эфир),
- 3) катализаторы (сильные минеральные кислоты).

Механические свойства пенофенопластов улучшают модификацией эпоксидными смолами, полиуретанами, акрилатными латексами. Применяются эти материалы как огнестойкая теплоизоляция в строительстве, холодильной технике, судостроении, вагоностроении, а также на теплотрассах, нефтепроводах и газопроводах.

3.5. ВОЛОКНА И ТКАНИ

Волокна и, получаемые из них ткани, издавна использовались людьми. В первую очередь, волокна и ткани применялись для производства одежды. В настоящее время, наряду с традиционными областями применения, волокна широко используются в промышленности (например, при производстве спецодежды, шин, конвейерных лент, приводных ремней, шлангов, армированных пластиков и т. д.).

Волокна бывают природные (натуральные) и химические. Природные волокна могут быть растительного происхождения, животного происхождения, а также минеральные. Волокна растительного происхождения формируются на поверхности семян (хлопок), в стеблях (лубяные — лен, джут, пенька, конопля и др.), в оболочках плодов (кора орехов кокосовой пальмы и др.). Из волокон растительного происхождения наиболее широко используются хлопковые волокна, обладающие хорошими механическими свойствами, износостойчивостью, термостабильностью, умеренной гигроскопичностью. Хлопок применяется в производстве бельевых, платьевых и других тканей, а также трикотажа, нетканых материалов, швейных ниток, ваты и проч. Лубяные волокна применяются в производстве тканей для одежды, тарных тканей, канатов, веревок.

Из волокон животного происхождения чаще всего используются шерсть и шелк. Шерсть характеризуется невысокой прочностью, большой эластичностью, высокой гигроскопичностью, низкой теп-

лопроводностью. Шелк (получаемый в виде волокон большой длины) обладает значительной прочностью, большой эластичностью, высокой гигроскопичностью. Шерсть используется для изготовления тканей бытового и технического назначения, трикотажа, валяльно-войлочных изделий; шелк — для выработки тонких платьевых и бельевых тканей, декоративных тканей, парашютов и проч.

Асбест характеризует высокая прочность, хорошие диэлектрические свойства, огнестойкость, химическая стойкость, низкая теплопроводность. Он используется в производстве теплозащитных, огнезащитных, химически стойких и других технических тканей.

Для изготовления различных изделий используются смеси природных и химических волокон. Но, несмотря на замечательные свойства природных волокон, ведущим современным направлением производства и применения волокон является использование химических волокон.

Химические волокна получают из растворов или расплавов волокнообразующих полимеров. Их подразделяют на синтетические (из синтетических полимеров) и искусственные (из природных полимеров или продуктов их переработки). Основные синтетические волокна это полиамидные, полиэфирные, полиакрилонитрильные и др. Искусственные волокна получают главным образом из эфиров целлюлозы (вискозное волокно, ацетатное волокно).

Формообразование химических волокон осуществляется продавливанием раствора или расплава волокнообразующего полимера через тонкие отверстия в металлической или стеклянной матрице (фильере) с последующим затвердеванием образующихся струй. Толщину получаемой нити-паутинки измеряют в денье (единица измерения толщины шелковых и подобных им нитей). Номер нити в денье соответствует ее весу в граммах при длине нити, равной 9 км. Например, для производства женских чулок и колготок обычно используют нить в 30 денье.

При формовании из раствора применяют мокрый, сухой и сухо-мокрый способы. Мокрый способ состоит в том, что струи раствора поступают в жидкость, способную осаждать полимер. Образующиеся при этом гелеобразные нити поступают на вращающийся диск. Их подвергают вытягиванию (в 1,5...2,5 раза), промывают от остатков растворителя и осадителя, сушат и принимают на веретено или собирают в жгут. Полученный жгут направляют непосредственно

на текстильную переработку или предварительно режут для получения штапельного волокна. При такой технологии скорость процесса составляет 20...150 м/мин. Мокрым способом формируют около 50 % всех волокон, в том числе вискозных, полиакрилонитрильных, из ароматических полиамидов, поливинилхлоридных, поливинилспиртовых.

Для сухого способа формообразования применяют преимущественно растворы полимеров в легколетучих растворителях (например, в ацетоне). Струи раствора поступают в вертикальную шахту высотой 4...6 м. В шахте циркулирует подогретый воздух, где струи вследствие испарения растворителя и затвердевают. Образующиеся при этом нити принимают на веретено. Данный способ используют, главным образом, для формообразования ацетатного волокна (скорость процесса составляет 200...1500 м/мин).

При формовании волокон по сухо-мокрому способу высококонцентрированный нагретый раствор полимера, выходящий из отверстий матрицы, проходит сначала через воздушную прослойку толщиной 5...50 мм, а затем поступает в осадительную ванну. Преимущество этого способа перед мокрым заключается в более высокой скорости процесса (60...300 м/мин). Его используют, главным образом, для формования волокон из термостойких полимеров, например, из полипарафенилентерефталамида (кевлар), и волокон полый структуры.

При формовании волокон из расплава в вертикальную шахту, которая охлаждается воздухом, из фильеры поступают нагретые до температуры 280...300 °С струи полимера. Затвердевшие нити подвергают 4,5...5,5-кратному ориентационному вытягиванию. Данный способ используется для формования волокон из полимеров, плавящихся без заметной деструкции (полиамидов, полиэтилентерефталата, полиолефинов). Скорость процесса достигает 500...5500 м/мин.

Для получения необходимого комплекса свойств после формования волокон их дополнительно обрабатывают (механически, термически, химически).

В начальном периоде использования химических волокон они по многим показателям уступали природным. Например, одежда из синтетических тканей накапливала статическое электричество, была склонна к световому старению и усадке, т. е. по своим санитарно-

гигиеническим свойствам была хуже, чем одежда из натуральных тканей. Однако в настоящее время химические волокна и полученные из них ткани по некоторым свойствам превосходят натуральные, т. е. обладают высокой прочностью, быстро высыхают, хорошо сохраняют форму. Например, в отличие от хлопчатобумажного брезента синтетический брезент не гниет, не покрывается плесенью и весит в 2 раза меньше. Сети из капрона намного прочнее и легче, чем сети из природных волокон. Капроновые сети не набухают в воде и их не надо сушить (что особенно важно для рыбаков). Авиационные и автомобильные шины служат значительно дольше, если при их производстве в резину запрессовывают капроновый, а не хлопчатобумажный корд.

Следует отметить, что изменяя химическое строение полимеров, можно управлять свойствами получаемых из этих полимеров волокон. Так, капролактан, являясь основой капрона и нейлона, имеет формулу $\text{CO}(\text{CH}_2)_5\text{NH}$ (т. е. шесть атомов углерода). Материал с таким химическим строением плохо впитывает влагу. Если же оставить в нем только четыре атома углерода, то полученный синтетический материал будет впитывать влагу, как губка. Можно воздействовать и на структуру нити. Если сделать нить гладкой или лохматой, то и свойства у нее будут различными. Если свернуть нить спиралью, которая в зависимости от наружной температуры будет изменяться по толщине, то можно будет получить «всесезонную» одежду (такая идея уже осуществлена технологами).

В США предложили другой способ терморегулирования. Нити ткани обволакивают воскообразным веществом, представляющим собой полиэтиленгликоль с молекулярным весом 1000 а.е.м. Молекулярная структура этого вещества в зависимости от температуры может находиться то в размягченном состоянии, то в твердом. При этом при размягчении тепло поглощается, а при затвердении высвобождается. Следует отметить, что одежда из такой ткани тоже будет греть на холоде и охлаждать в жару, т. е. идеально подходит при работе в экстремальных климатических условиях.

Спецодежда, разработанная из тканей на основе синтетических волокон, обладает уникальными свойствами. Уже разработана рабочая одежда, для изготовления которой использованы искусственные ткани, отталкивающие пыль, пропускающие воздух и не пропускающие воду, способные улавливать ионы драгоценных металлов,

отпугивать насекомых, защищать человека от воздействия вредных газов и агрессивных химических жидкостей. Бронежилеты и костюмы для саперов и космонавтов невозможно было бы изготовить из натуральных волокон. Например, космический скафандр должен обладать высокой прочностью и износоустойчивостью, не пропускать тепло и холод, а также не гореть и не плавиться, не коробиться и не ломаться при перепаде температур. Кроме того, этот скафандр должен хорошо отражать прямые солнечные лучи.

Подобными качествами обладают ткани из стекловолна с покрытием из тефлона, которое может быть еще дублировано отражающей алюминиевой пленкой. В настоящее время многие химические волокна создаются по принципу композиционных материалов и область их применения постоянно расширяется.

Следует отметить, что по сравнению с природными волокнами химические волокна имеют важные преимущества: обширную сырьевую базу, высокую рентабельность производства и его независимость от климатических условий, возможность направленного изменения свойств волокон.

3.6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

В промышленности, как правило, используются следующие технологические методы формообразования изделий из пластмасс: экструзия, прессование, литье под давлением, спекание, механическая обработка, сварка.

При переработке в изделия термопласты подвергаются воздействию теплоты, механического давления, кислорода воздуха и света. Чем выше температура, тем материал пластичнее и тем легче проходит процесс переработки. Однако под влиянием высоких температур и названных выше факторов в пластмассах происходят разрыв химических связей, окисление, образование новых нежелательных структур, перемещение отдельных участков макромолекул и их самих относительно друг друга, ориентация макромолекул в различных направлениях.

Основной задачей при переработке пластмасс является замедление отрицательных процессов и создание необходимой структуры материала. Самыми простыми приемами для дости-

жения этой цели являются регулирование температуры, давления, скорости нагрева и охлаждения материала. Кроме того, используют стабилизаторы, увеличивающие стойкость материала против старения, пластификаторы, понижающие вязкость материала и повышающие гибкость молекулярных цепей, а также различные наполнители, которые вводят в материал при переработке.

Особенность переработки реактопластов в изделия состоит в сочетании формования с отверждением, т. е. с химическими реакциями образования сшитой структуры макромолекул. Неполное отверждение ухудшает свойства материала. Достижение необходимой полноты отверждения (даже в присутствии катализаторов и при повышенных температурах) требует значительного времени, что увеличивает трудоемкость изготовления детали. Окончательно отверждение материала может происходить вне формующей оснастки, так как изделие приобретает устойчивую форму до завершения этого процесса.

При переработке композиционных материалов большое значение имеет адгезия (сцепление) связующего вещества с наполнителем. Величина адгезии может быть повышена путем очистки поверхности наполнителя и сообщения ей химической активности. При плохой адгезии связующего вещества с наполнителем в материале появляются микропоры, которые значительно снижают его прочность. При переработке термопластов происходит ориентация их макромолекул, причем прочность материала в направлении ориентации возрастает, а в поперечном направлении — уменьшается. При получении пленок и тонкостенных изделий это явление играет положительную роль, а в остальных случаях — отрицательную (вызывает структурную неоднородность и служит причиной возникновения остаточных напряжений). Различия по сечению изделия в скоростях охлаждения, степени кристаллизации, полноте релаксационных процессов (для термопластов) и степени отверждения (для реактопластов) приводят также к структурной неоднородности и появлению дополнительных остаточных напряжений в изделиях. Для снижения остаточных напряжений применяют термическую обработку изделий, формирование структуры при переработке и другие технологические приемы.

3.6.1. Получение изделий из термопластов

Для изготовления изделий из термопластов, как правило, используют:

- 1) литье под давлением;
- 2) центробежное литье;
- 3) свободное литье;
- 4) экструзию (выдавливание);
- 5) раздувку;
- 6) формование (вакуумное и пневматическое);
- 7) штамповку.

Литье под давлением является наиболее распространенным и высокопроизводительным методом получения конструкционных деталей из термопластов. Литье под давлением осуществляется на литьевых машинах (рис. 3.7) и заключается в размягчении материала в цилиндре 4 за счет нагрева нагревателями 8 и перемешивания шнеком 5 до вязкотекучего состояния. При поступательном движении шнека материал через сопло 6 под давлением впрыскивается в литьевую форму 7, где он охлаждается и застывает, повторяя конфигурацию формы.

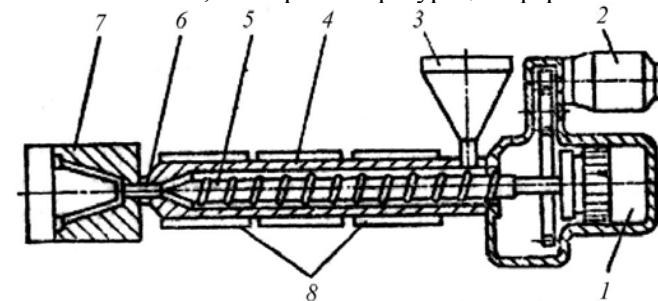


Рис. 3.7. Схема шнековой литьевой машины:

- 1 — гидравлический цилиндр; 2 — привод; 3 — бункер; 4 — цилиндр;
5 — шнек; 6 — сопло; 7 — литьевая форма; 8 — нагреватели

Литьевая форма состоит из правой (неподвижной) и левой (подвижной) частей. При размыкании формы ее левая часть (пуансон) с изделием отходит влево и после соприкосновения с выталкивателем изделие падает в приемный лоток. Весь процесс (от подачи гранул материала до транспортировки готового изделия) может быть автоматизирован. Наряду со шнековыми литьевыми машинами для перера-

ботки термопластов применяют поршневые литьевые машины, в которых перемешивание материала осуществляется в меньшей степени.

Режимы переработки термопластов подбирают в зависимости от вида материала и конструкции изделия. При переработке термопластов в изделия применяют следующие удельные давления: 7...20 МПа (для полиэтилена), 15...80 МПа (для капрона), до 150 МПа (для полистирола). При этом на выходе из сопла температура материалов должна быть соответственно 175...260 °С, 200...280 °С, 150...215 °С. Температуру литьевой формы поддерживают соответственно 45...60 °С (при переработке полиэтилена), 50...135 °С (капрона), 25...40 °С (полистирола).

Необходимость относительно высокого давления при этом методе переработки объясняется следующим. Переход материала в зону высокой текучести наступает при сравнительно высокой температуре, когда возможно появление брака. Поэтому термопласты формуют в условиях ограниченной текучести, а ее недостаток компенсируют большим давлением. Кроме того, плотность материала в расплаве мала (в охлажденном состоянии она выше за счет появления кристаллической фазы). Поэтому возможна нежелательная усадка, приводящая к изменению размеров детали. Для устранения этой усадки в форму под большим давлением подают максимальное количество материала.

Температуру литьевой формы поддерживают на определенном уровне (для уменьшения в детали больших остаточных напряжений, которые могут возникать при соприкосновении нагретого материала с чрезмерно холодными стенками формы). При литье под давлением получают изделия массой от нескольких граммов до нескольких килограммов с толщиной стенок до 10 мм (реже до 15...20 мм).

Преимуществами литья под давлением являются следующие: малая трудоемкость изготовления детали (около 2 минут при одногнездной форме), высокая точность размеров деталей с хорошей чистой поверхности, возможность автоматизации процесса. К недостаткам процесса относятся появление в деталях остаточных напряжений и расход материала на литники, необходимые для его подвода в форму.

Метод *экструзии* заключается в размягчении материала и непрерывном выдавливании червячными или дисковыми устройствами этого материала в вязкотекучем состоянии через профилирующее отверстие головки с последующим охлаждением изделия. Этим методом получают трубы, стержни, листы, пленки, а также изделия, имеющие поперечные сечения в виде различных профилей. Экструдер по кон-

рукции похож на литьевую шнековую машину, но у него на выходе установлено охлаждающее устройство, а вместо литьевой формы установлена головка с профилирующим отверстием.

Наряду с методом литья под давлением, метод экструзии является одним из самых распространенных при переработке термопластов. Преимуществом этого метода является высокая производительность, равная 1 м/мин готового изделия.

Центробежное литье заключается в том, что расплав термопласта заливают в нагретую цилиндрическую форму, которую приводят во вращение. Центробежная сила отбрасывает материал к стенкам формы и уплотняет его. После охлаждения и остановки формы изделие извлекают и подвергают механической обработке. Этим методом изготавливают толстостенные трубы, втулки, шестерни и заготовки.

При *свободном литье* разогретый материал отверждается в форме без давления. Преимуществом свободного литья является простота, однако его использование ограничено из-за возможного появления в изделии раковин и других дефектов. Для устранения дефектов процесс проводят на вибростоле с использованием вакуума, что позволяет уплотнить материал и удалить газы, выделяющиеся при полимеризации. Этот метод применяют для получения изделий и заготовок массой до нескольких десятков килограммов из органического стекла, а также капролита.

Метод *раздувки* используют для изготовления пустотелых изделий (канистры, бутылки) и пленок. При этом методе термопласт выдавливается через головку экструдера в виде трубчатой заготовки. К заготовке подводят две полуформы (рис. 3.8), и соединяют их. Через горловину изделия подводят сжатый воздух, который раздувает заготовку до необходимой конфигурации. За один час изготавливают 600 бутылей вместимостью 500 см³.

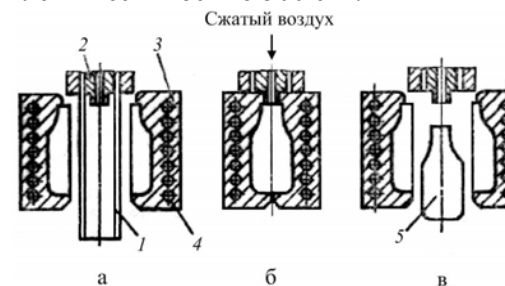


Рис. 3.8. Схема раздувки полых изделий:

- а — форма разомкнута (подача заготовки); б — форма сомкнута и подается сжатый воздух; в — форма разомкнута; 1 — трубчатая заготовка; 2 — головка экструдера; 3 — форма; 4 — каналы для охлаждения формы; 5 — изделие

Метод раздувки является основным для получения пленок из полиэтилена, полипропилена и других материалов (рис. 3.9), которые не подвергаются термической деструкции при переходе в вязкотекучее состояние. При этом методе расплав полимера экструдирован в виде рукава, который затем растягивается сжатым воздухом. Это наиболее экономичный и производительный процесс изготовления пленок. Диаметр рукава пленки здесь может достигать 16 м.

Кроме метода раздувки для изготовления пленок используют полив раствора полимера (целлюлоза, полиамиды, поликарбонат и др.) на полированную поверхность, каландрование — прокатка пластифицированного полимера (поливинилхлорида) через систему валков с изменяющимся зазором между ними и снятие с заготовки широким резцом стружки с последующей калибровкой. Последнее используют для получения пленки из фторопласта-4, способного разлагаться с выделением фтора при нагреве до момента перехода материала в вязкотекучее состояние.

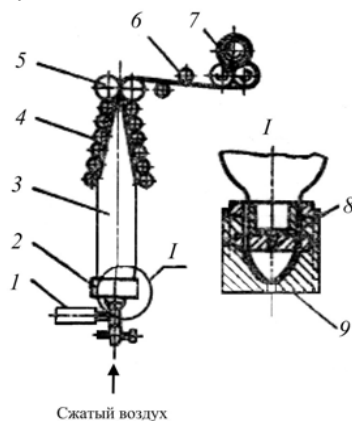


Рис. 3.9. Схема получения пленки методом раздувки:

1 — экструдер; 2 — формирующая головка; 3 — рукав пленки; 4, 6 — направляющие ролики; 5 — тянущие ролики; 7 — барабан с пленкой; 8 — канал для подачи сжатого воздуха; 9 — канал для подачи расплавленного полимера

Методом вакуумного или пневматического формования перерабатывают листовые термопласты (органическое стекло, полистирол и др.). При этом (рис. 3.10) формование материала осуществляется под воздействием силы, возникающей из-за разности между атмосферным давлением воздуха и разрежением внутри формы. Эта сила деформирует на-

гретый до высокоэластического состояния лист термопласта, придавая ему необходимую форму. Для фиксации полученной формы изделия его охлаждают. Метод вакуумного формования используют для изготовления изделий из пленок и тонких листов.

Для переработки толстых листов вакуумное формование дополняют механическим и пневматическим формованием. При пневматическом формовании нагретый лист термопласта устанавливают в форме и подвергают воздействию избыточного давления, которое производится воздухом. Так изготавливают крупногабаритные детали для холодильников, различные ванны и т. п.

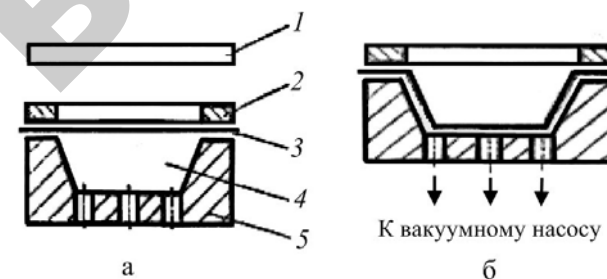


Рис. 3.10. Схема вакуумного формования: а — нагрев; б — формование; 1 — нагреватель; 2 — прижимная рамка; 3 — лист термопласта; 4 — вакуумная камера; 5 — форма

Штамповку используют для изготовления тонкостенных и крупногабаритных изделий. Формование изделий этим методом осуществляется в результате вытяжки, изгиба или сжатия заготовок пуансоном. Заготовки обычно нагревают до высокоэластического состояния. Если материал способен к большим вынужденным высокоэластическим деформациям под влиянием значительного давления, то заготовки не нагревают.

Разновидностью штамповки является вырубка с помощью штампов, оснащенных режущими элементами. Вырубкой изготавливают прокладки, монтажные, колодки, заготовки для печатных плат из фольгированных материалов.

3.6.2. Получение изделий из реактопластов

Для изготовления изделий из реактопластов, как правило, используют прессование, а также намотку, протяжку, прокатку и (сравнительно реже) некоторые методы литья.

Пресс-порошки, волокниты, стекловолокниты перерабатывают в изделия методом прессования, заключающимся в пластической деформации материала при одновременном воздействии теплоты и давления с последующей фиксацией формы изделия.

При *прессовании* материал превращается в расплав, который уплотняется, заполняет формующую полость пресс-формы и отверждается. В процессе уплотнения происходит сближение частиц до такого расстояния, что между ними возникают силы межмолекулярного взаимодействия, в результате чего образуется компактное тело, которое затем подвергается объемному сжатию.

Основными параметрами технологического процесса прессования являются температура прессования, давление и время выдержки деталей под давлением в пресс-форме.

Например, для реактопластов на основе фенолоформальдегидной смолы (пресс-порошки, волокниты, стекловолокниты и другие) температура прессования составляет 140...160 °С, давление прессования — 25...55 МПа, выдержка при прессовании — 1...2,5 мин на 1 мм толщины детали. Давление прессования и время выдержки на 1 мм толщины для конкретных изделий устанавливают экспериментально, а температура прессования может быть определена аналитически. При этом большое давление прессования ограничивает возможные размеры изделия.

Следует отметить, что необходимость нагрева материала и его выдержки под давлением приводит к повышению трудоемкости изготовления деталей. Средняя трудоемкость изготовления одной детали методом прессования составляет 20 минут. Для снижения трудоемкости применяют таблетирование материала и предварительный его подогрев в термостатах токами высокой частоты или на плитах пресса. Это позволяет в 2...3 раза сократить время выдержки под давлением и на 50 % снизить давление, а также уменьшить износ пресс-форм и улучшить свойства изделия.

Различают прямое (компрессионное), литьевое и штранг-прессование.

Прямое прессование осуществляют в открытых, закрытых и полузакрытых пресс-формах (рис. 3.11). Открытые пресс-формы состоят из матрицы 1, пуансона 2 и выталкивателя 4 (рис. 3.11, а). Эти пресс-формы просты в изготовлении, имеют небольшую массу, низкую стоимость и используются для получения изделий неслож-

ной формы из реактопластов, формования резиновых изделий, а также некоторых деталей из слоистых пластмасс. Изделия, формованные в открытых пресс-формах, имеют невысокую точность размеров по высоте, которые зависят от толщины грата, образующегося в плоскости разъема. Такие пресс-формы требуют применения предварительно уплотненного материала (например, таблетированного), поскольку объем навески материала часто больше объема открытой полости матрицы. Исключение составляют резиновые смеси, плотность которых близка к плотности изделия.

Пресс-формы закрытого типа (рис. 3.11, б) имеют загрузочную камеру и вытекание материала из формовочной полости в них практически исключено. Эти пресс-формы требуют точной подгонки пуансона и матрицы. Они дорогостоящи, быстро изнашиваются и используются для изготовления глубоких тонкостенных изделий из трудно формующих волокнистых или слоистых материалов.

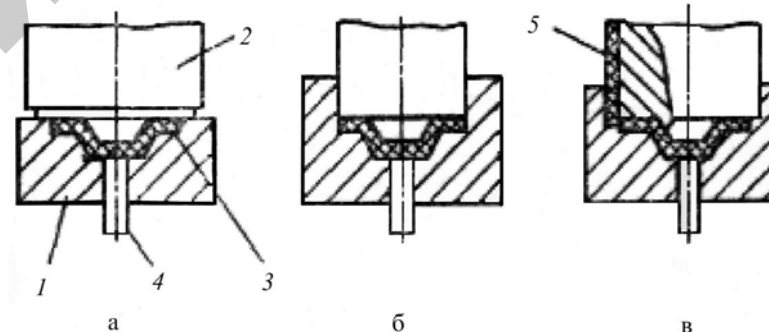


Рис. 3.11. Схемы пресс-форм прямого прессования:
а — открытая пресс-форма; б — закрытая; в — полузакрытая;
1 — матрица; 2 — пуансон; 3 — изделие; 4 — выталкиватель; 5 — избыточный материал

Пресс-формы полузакрытого типа (рис. 3.11, в) имеют большую площадь загрузочной камеры, чем площадь горизонтальной проекции формуемого изделия, что препятствует вытеканию материала из незамкнутой пресс-формы. Кроме того, между пуансоном и матрицей имеется гарантированный зазор для вытекания избытка материала, величина которого значительно меньше, чем при использовании пресс-форм открытого типа. Эти пресс-формы имеют наибольшее распространение.

Литьевое прессование применяется для изготовления деталей сложной конфигурации с металлической арматурой и малой толщиной стенок. При литьевом прессовании (рис. 3.12) материал пластифицируется в загрузочной камере и по литниковому каналу поступает в формующую часть пресс-формы. Материал в пластичном состоянии не сдвигает металлическую арматуру и легко проникает в узкие полости пресс-формы. Высокая стоимость пресс-форм и повышенный расход материала являются недостатками такого прессования. Для повышения производительности метода прессования порошкообразных и волокнистых пластмасс используют многогнездные пресс-формы, роторные автоматические линии и другие специализированные автоматические установки.

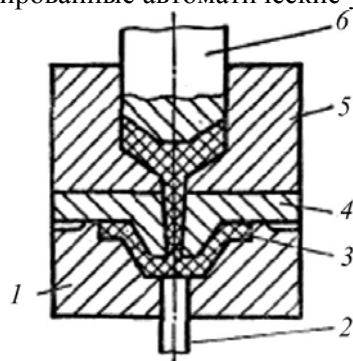


Рис. 3.12. Схема пресс-формы литьевого прессования:

1 — матрица; 2 — выталкиватель; 3 — изделие; 4 — пуансон; 5 — загрузочная камера; 6 — пуансон загрузочной камеры

Для изготовления профильных изделий из пресс-порошков и асболокнита применяют *штранг-прессование*, которое заключается в выдавливании материала через пресс-форму с открытым входным и выходным отверстиями или через специальную головку. Штранг-прессование занимает промежуточное положение между прессованием и экструзией. Уплотнение материала при этом достигается за счет разницы в площадях пуансона и выходного отверстия матрицы. Например, для реактопластов площадь пуансона в 3,5...5 раз больше, чем площадь выходного отверстия матрицы.

Штранг-прессование осуществляется на горизонтальных прессах, поршни которых медленно совершают рабочий ход и быстро возвращаются в исходное состояние. Этот метод используют также

при переработке фторопластов и для изготовления массивных стержней и толстостенных труб из жесткого поливинилхлорида.

Листовые материалы — текстолит, асботекстолит, стеклотекстолит, гетинакс, древесно-слоистые пластики получают прессованием на многоэтажных прессах. Наполнители в виде ткани (хлопчатобумажной, асбестовой, стеклянной), бумаги, древесного шпона пропитывают связующим веществом (фенолоформальдегидная, эпоксидная и другие смолы) и подсушивают. Листы наполнителя укладывают между полированными металлическими листами. Получающиеся пакеты помещают между плитами прессы, нанеся перед этим смазку между металлическими листами. Под влиянием температуры и давления связующее вещество расплавляется, а затем отверждается, образуя из отдельных листов монолитный материал. После выдержки под давлением пакеты охлаждают до температуры 30...40 °С, извлекают из прессы и обрезают облой.

Для переработки стеклопластиков в изделия используют следующие методы: контактный; формование с резиновым чехлом; формование с упругим пуансоном или матрицей; пресс-камерный; компрессионное прессование и др.

При *контактном методе* используют стеклоткани и полиэфирную или эпоксидную смолу, которая способна отверждаться при комнатной температуре без давления за счет введения специальных веществ — полиэтиленполиамин (для эпоксидной смолы), а также нафтената кобальта и гидроперокси кумола (для полиэфирной смолы). После введения отвердителей жизнеспособность связующего, т. е. время до образования сшитой структуры макромолекул, составляет около 4 часов. За это время вся порция приготовленной смолы должна быть переработана. Для осуществления контактного метода необходима модель, повторяющая конфигурацию и размеры изделия. С целью предотвращения сцепления стеклопластика с моделью ее покрывают разделительным слоем, для создания которого используют технический вазелин, пленку, поливиниловый спирт. Пропитанную смолой стеклоткань укладывают на модель и прикапывают роликом для устранения пустот и неровностей. Число слоев стеклоткани определяется необходимой прочностью изделий. При использовании одного слоя стеклоткани марки ТЖС-0,7 достигается толщина изделия около 1 мм. Для получения товарного вида изделия рекомендуется применять стеклоткань, имеющую более мел-

кое переплетение. При этом время отверждения составляет около 48 часов. После отверждения изделия его снимают с формы.

Контактный метод прост и не требует высококвалифицированного труда, но является трудоемким. Кроме того, за счет неполного отверждения связующего вещества и малого давления в ряде случаев изделия имеют недостаточную прочность.

Этот метод используют при мелкосерийном производстве для изготовления крупногабаритных изделий сложной конфигурации (кузова спортивных автомобилей, детали легковых автомобилей, лопасти вентиляторов, мелкие суда, шлюпки, лодки, катера).

При формовании изделий с резиновым чехлом, резиновым пуансоном или матрицей снижается трудоемкость изготовления изделий и повышается их качество (по сравнению с контактными способами).

Формование с резиновым чехлом заключается в том, что модель с уложенной на нее пропитанной смолой и подсушенной стеклотканью покрывают тонкой металлической оболочкой и резиновым чехлом, который герметически прижимается к модели. Из полости между чехлом и пакетом стеклоткани откачивают воздух. За счет разницы между атмосферным давлением и разрежением осуществляется формование. Давление формования при этом составляет 0,05...0,09 МПа. Нагрев изделия в этом случае производится электронагревателями, установленными в стенках формы или в термошкафу. Для повышения давления формования до 0,3...2,5 МПа используют автоклав.

При прессовании с упругим пуансоном или матрицей давление распределяется более равномерно, чем при металлическом пуансоне. При этом пакет приготовленной стеклоткани укладывают в матрицу или на пуансон, нагревают и под давлением прессуют.

Пресс-камерный способ переработки стеклопластиков рассмотрим на примере изготовления крупногабаритной лопасти осевого вентилятора. Пресс-форма для такой лопасти состоит из двух половин, которые устанавливают на пресс, обеспечивающий необходимые давление и температуру. В нижнюю часть пресс-формы укладывают пакет стеклоткани, предварительно пропитанной смолой и подсушенной для удобства работы. На стеклопакет насыпают гранулированный пенопласт, сверху которого укладывают еще один пакет стеклоткани и опускают верхнюю половину пресс-формы. Имеющиеся в пресс-форме режущие кромки перерезают излишки стеклоткани по периметру изделия. Под влиянием теплоты пено-

пласт вспенивается, его объем увеличивается в несколько раз и развивается избыточное давление, которое формирует оболочки лопасти. Изделие получается с большой точностью, с хорошей чистой поверхностью и с внутренним пенопластовым сердечником.

Схема намотки стеклопластиковых изделий приведена на рисунке 3.13. Намотку различают «мокрую» и «сухую».

При «мокрой» намотке стекложгут, сматываясь с бобины 1, пропитывается связующим в ванне 2 и наматывается на оправку 4 (рис. 3.13). При «сухой» намотке стеклонаполнитель пропитывается смолой под давлением после намотки.

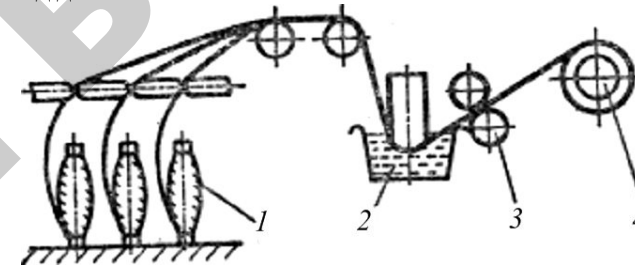


Рис. 3.13. Схема намотки стеклопластиковых изделий:
1 — бобины со стекложгутом; 2 — ванна со связующим;
3 — обжимные валики; 4 — оправка

Существуют различные схемы намотки стеклонаполнителя. При этом наиболее распространенными являются спиральная намотка и продольно-поперечная.

Спиральная намотка осуществляется при вращении оправки и возвратно-поступательном движении каретки. При продольно-поперечной намотке стекложгут с помощью специальных устройств укладывается на оправку по образующей цилиндра и по кольцу. Продольно-поперечная намотка обеспечивает максимальную прочность изделия. Так изготавливают трубы, цистерны, баки, сопловые раструбы и корпуса двигателей для ракет и др.

Методом *протяжки* изготавливают профильные изделия (трубки, стержни, уголки и т. д.). Стекложгут или стеклонити сматывают с бобин, пропитывают связующим веществом в ванне, собирают в пучок и протягивают через формующую головку. Здесь изделию придается форма и осуществляется его частичное отверждение. Для более полного отверждения изделие помещают в термокамеру.

Методом *прокатки* изготавливают плоские и гофрированные листы из стеклопластика. Стекломат или стеклоткань пропитывают смолой в ванне, затем отжимными валиками удаляют избыток смолы. Пропитанные листы покрывают целлофаном, спрессовывают и отверждают при пропускании их через обогреваемые валики.

Для изготовления некоторых изделий из стеклопластика используют компрессионное прессование с применением открытых прессформ.

Сравнительно реже для переработки реактопластов используют литье под давлением, так как в случае малейшего нарушения технологического режима они могут затвердевать в цилиндре, вызывая длительную остановку машины.

Методы центробежного и свободного литья иногда применяют для изготовления изделий из эпоксидных и полиэфирных смол холодного отверждения с наполнителями.

3.6.3. Обработка пластмасс резанием

При изготовлении деталей из пластмасс в некоторых случаях для формообразования и отделки используют технологии обработки резанием. Пластмассы распиливают, точат, сверлят, фрезеруют, шлифуют, полируют.

По сравнению с металлами пластические массы обладают повышенной упругой деформацией, вследствие чего при их обработке применяют более высокие давления, чем при обработке металлов. Применять при этом смазку, как правило, не рекомендуется (только в некоторых случаях при окончательной обработке допускается применение минерального масла). Охлаждать изделие и инструмент следует струей воздуха. Пластические массы более хрупки, чем металлы, поэтому при обработке пластмасс режущими инструментами необходимо применить высокие скорости резания и уменьшать подачу. Износ инструмента при обработке пластмасс достаточно высок, поэтому необходимо применять инструмент из высокоуглеродистой или быстрорежущей стали или же из твердых сплавов. Лезвия режущих инструментов следует затачивать (по возможности) более остро, пользуясь для этого мелкозернистыми кругами.

Для распиливания слоистых пластических масс применяют ленточные и дисковые пилы, а также карборундовые круги. Ленточ-

ными пилами можно пользоваться для распиливания по прямой линии плит толщиной до 25 мм. При этом скорость пилы составляет 1200...2000 м/мин. Зубья пил должны быть конусными (по 3 зуба на 1 погонный см). Зубья затачивают поперек и разводят так, чтобы ширина пропила была равна, по крайней мере, двойной толщине пилы. Дисковыми пилами можно резать пластмассы толщиной до 50 мм. Скорость вращения пилы (при ее диаметре 330 мм) составляет 2000...3000 об/мин. Карборундовые круги применяют для распиливания особо твердых материалов.

При токарной обработке не рекомендуют применять подачи более 0,3...0,5 мм/об. Скорость резания при использовании резцов из твердых сплавов может составлять 60...100 м/мин, а при использовании резцов из быстрорежущей стали — 30...40 м/мин. Величина заднего угла резца не должна превышать 10...12° (лишь при обдирке можно его увеличить до 15°). Вершину резца закругляют, причем радиус закругления должен быть 3...4 мм, а угол наклона режущей кромки — 4...5°.

Для сверления пластмасс рекомендуют пользоваться перовыми сверлами из быстрорежущей стали со шлифованными режущими кромками. Угол заострения для слоистых материалов при обработке параллельно слоям должен составлять 100...125°, а для пластмасс, обрабатываемых перпендикулярно слоям, для карболита и других — 55...70°. Скорость резания составляет 30...40 м/мин, а подача — 0,2...0,34 мм/об. При сверлении слоистой пластмассы вдоль слоев, чтобы предупредить растрескивание материала, подача не должна превышать 0,25 мм/об, материал же, для предупреждения выламывания, надо зажимать в тисках. Сверление отверстий диаметром более 20 мм рекомендуется заменять растачиванием на токарном станке. Сверло необходимо периодически извлекать из отверстия, давая возможность охладиться инструменту и обрабатываемому материалу. Просверленные отверстия обычно оказываются меньше диаметра сверла на 0,03...0,06 мм.

Для фрезерования плоскостей, пазов, канавок и проч. применяют фрезы с простым зубом. Скорость резания для торцовых фрез составляет 46...52 м/мин, для фасонных — 24...27 м/мин, а средняя величина подачи — 0,1 мм/об.

Отверстия в слоистом материале удовлетворительно пробиваются при нормальной температуре (комнатной) обычным вырубным штам-

пом. Зазор между пуансоном и матрицей должен быть минимальным (около 0,1 мм). Слоистые материалы толщиной 3,5...5 мм удовлетворительно пробиваются лишь в нагретом до температуры 90...100° состоянии. При этом для нагревания обрабатываемого материала используют масляные ванны. Следует отметить, что расстояние между соседними пробиваемыми отверстиями должно составлять не менее, чем двойная толщина обрабатываемого материала.

Шлифовку пластических масс производят наждачной бумагой, прикрепляемой к деревянному кругу, скорость вращения которого должна быть около 7 м/сек. Изделия простой формы полируют фланелевым кругом, не применяя полировочных составов. Изделия сложной формы сначала полируют матерчатым кругом с применением обычной полировочной пасты, а затем — сухим фланелевым кругом. Круг диаметром 300 мм должен вращаться со скоростью 1200 об/мин.

3.7. МЕТОДЫ СОЕДИНЕНИЯ ПЛАСТМАСС

Одним из основных методов неразъемного соединения пластмасс является сварка. Сварка, главным образом, применяется для соединения термопластов. Сварку выполняют путем перевода соединяемых деталей в вязкотекучее состояние, при котором макромолекулы материала обладают повышенной подвижностью, и последующего сдавливания места соединения определенным усилием. При этом происходит взаимная диффузия макромолекул или их частей, за счет чего после охлаждения деталей осуществляется их соединение, прочность которого определяется силами взаимодействия (межатомного и межмолекулярного).

При сварке пластмасс достигается однородный состав и одинаковые свойства материала в месте соединения. Процесс сварки может быть механизирован и автоматизирован.

Основными параметрами сварки пластмасс являются температура, продолжительность нагрева материала и давление на свариваемые детали. Длительность нагрева пластмасс во всех случаях должна быть минимальной во избежание деструкции материала. По той же причине не рекомендуется применять многократное повторение сварки. Из-за низкого коэффициента теплопроводности в

сварном шве возникают остаточные напряжения, для удаления которых необходимо применять медленное охлаждение.

Существуют следующие основные методы сварки термопластов: газовая, нагретым инструментом, нагретым присадочным материалом, током высокой частоты, ультразвуковая, трением, с применением инфракрасного излучения, лазерная. Перечисленные методы отличаются друг от друга способом разогрева соединяемых поверхностей.

При газовой сварке основным инструментом является газовая горелка. В газовой горелке с электрическим подогревом газ проходит через электрический нагревательный элемент. В горелке с газовым подогревом теплоноситель проходит по змеевику, который нагревается при сгорании горючего газа. Кроме того, существуют газовые горелки прямого нагрева, у которых теплоноситель поступает в камеру сгорания и там нагревается.

В качестве теплоносителя чаще всего используют воздух, но для материалов, подверженных термоокислительной деструкции, — инертные газы (азот, аргон). С помощью теплоносителя осуществляется разогрев соединяемых поверхностей. Температура теплоносителя на выходе из горелки должна быть на 50...100 °С выше, чем температура текучести термопласта. Сварку можно осуществлять с присадочным материалом (рис. 3.14) и без него. Наиболее часто используют сварку с присадочным материалом. Присадочный материал в виде прутков диаметром 1,5...4 мм изготавливают из того же материала, что и свариваемое изделие, но для повышения пластичности в его состав вводят пластификатор.

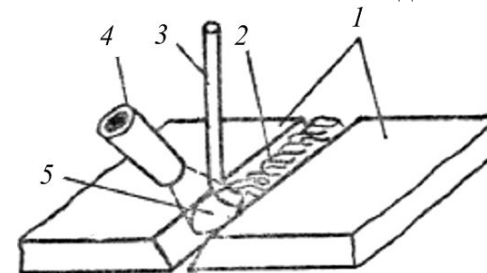


Рис. 3.14. Газовая сварка с присадочным материалом:

1 — свариваемые детали; 2 — сварной шов; 3 — пруток присадочного материала; 4 — наконечник газовой горелки; 5 — зола нагрева

Газовой сваркой с применением присадочного материала соединяют толстостенные детали из поливинилхлорида, полиэтилена, органического стекла, полистирола, капрона, полиформальдегида.

Сварку нагретым газом с присадочным материалом используют при футеровке травильных ванн, стыковке труб, листов линолеума, при изготовлении баков аккумуляторов и др. Недостатками этого метода являются низкая производительность и трудность сохранения на должном уровне основных параметров технологического процесса сварки.

При сварке *нагретым инструментом* соединяемые детали нагреваются при контакте с горячими металлическими лентами, дисками, пластинками, зажимами прессы и др. Этот метод применяется для сварки толстостенных изделий (трубы, плиты, профили и др.) и пленок.

При сварке толстостенных изделий инструмент после прогрева детали удаляют, соединяемые поверхности приводят в контакт и шов под давлением охлаждают. Для изделия из полиэтилена высокого давления температура на поверхности нагревателя составляет 180 ± 10 °С, время нагрева — 45 ± 15 с, давление при нагреве — 0,05 МПа, давление при соединении поверхностей — 0,1 МПа.

Сварку нагретым инструментом используют для соединения пленок полиолефинов толщиной 20...250 мкм. При этом используют малоинерционный нагреватель (ленту или проволоку), через который периодически пропускают электрический ток. При отключении тока сварной шов быстро охлаждается. Пленку при этом зажимают между губками специального устройства.

Сварка *нагретым присадочным материалом* заключается в том, что присадочный материал в пластичном состоянии подается из нагревательного устройства (например, экструдера) на соединяемые поверхности и сплавляется с ними. После охлаждения получается однородная структура, обеспечивающая высокую прочность шва. Метод обеспечивает высокую производительность, его используют, главным образом, для соединения пленок и тонколистовых материалов. В тех случаях, когда нужно получить короткие стыковые швы (например, при футеровке резервуаров) применяют экструзионный пистолет.

Сварка *током высокой частоты* основана на разогреве полимеров при прохождении через них переменного электрического тока. Этот метод используют, главным образом, для по-

лучения полярных полимерных материалов (поливинилхлорида, капрона и другие), которые обладают дипольной поляризацией при помещении их в электрическое поле (рис. 3.15).

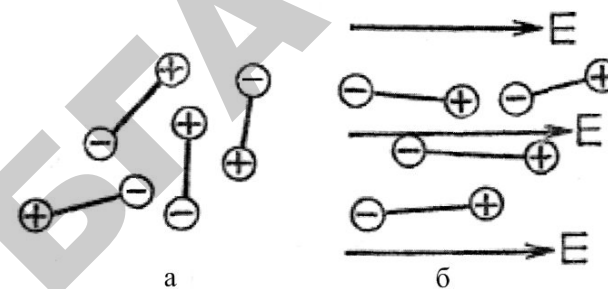


Рис. 3.15. Схема расположения диполей полярного полимерного материала:
а — до помещения материала в электрическое поле;
б — после помещения материала в электрическое поле

В соответствии с изменяющимся знаком заряда на электроде в переменном электрическом поле происходит реполяризация. Затраченная на нее энергия преобразуется в теплоту, за счет чего и осуществляется разогрев соединяемых изделий. Одновременно через электроды передается давление (они же охлаждают свариваемые поверхности). Такая сварка обеспечивает высокую скорость и равномерность нагрева.

При сварке токами высокой частоты (ТВЧ) можно точно отрегулировать значения основных параметров технологического процесса, что гарантирует высокое качество сварного шва. При необходимости такой сварки неполярных материалов между электродами и свариваемыми поверхностями необходимо поместить полярный материал, за счет нагрева которого и произойдет разогрев свариваемого неполярного материала. Высокочастотные сварочные установки обеспечивают работу при частоте электрического тока 27 и 41 МГц. Из-за высокой стоимости оборудования сварку ТВЧ целесообразно применять при серийном производстве деталей.

При *ультразвуковой* сварке разогрев соединяемых поверхностей происходит в результате пластических деформаций материала под действием ультразвуковых колебаний инструмента.

Схема установки для сварки ультразвуком показана на рисунке 3.16. Токи высокой частоты подаются на обмотку вибратора 1, сердечник которого выполнен из магнитоstrictionного материала. Его линейные размеры изменяются в зависимости от изменения магнитного поля, возникающего при прохождении тока по обмотке. Сердечник соединен с волноводом 2, который воздействует на свариваемые детали. Процесс сварки длится 1...8 с. При этом обеспечивается высокое качество сварного шва. Этой сваркой можно сваривать разнородные материалы, изделия различной толщины (за счет локального разогрева соединяемых поверхностей), а также загрязненные материалы, так как все инородные частицы удаляются из зоны шва за счет колебаний. Возможно осуществление сварки ультразвуком в труднодоступных местах.

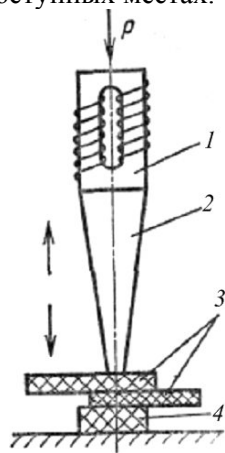


Рис. 3.16. Схема ультразвуковой сварки пластмасс:

1 — вибратор; 2 — волновод; 3 — свариваемые детали; 4 — отражатель

Сварку ультразвуком можно применять для соединения деталей из полиэтилена, винипласта, полистирола, органического стекла, полиамидов.

Сварка *трением* основана на преобразовании механической энергии в тепловую при трении вращающейся и неподвижной деталей. Поскольку термопласты имеют низкую теплопроводность, то теплота концентрируется около места контакта деталей. Для осуществления сварки трением используют токарные или сверлильные станки. При

оптимальных режимах прочность полученного соединения близка к прочности свариваемого материала. Однако при этом шов часто имеет пористую структуру и нежелательные утолщения от сжатия свариваемых деталей. Для сварки деталей из полиэтилена высокого давления рекомендуют применять скорость вращения 90...120 м/мин и давление 0,2...0,5 МПа.

Сварка с применением *инфракрасного излучения* (ИК) основана на нагреве соединяемых поверхностей за счет поглощения ИК-излучения. Большинство полимеров поглощает ИК-излучение при его длине волны более 2,5 мкм. В качестве источника ИК-излучения используют кварцевые лампы, силитовые стержни и нихромовые нагреватели.

При *лазерной* сварке разогрев соединяемых поверхностей осуществляется лазерным лучом, сфокусированным в пятно диаметром около 1 мм и направленным перпендикулярно к свариваемому пакету. Лазерная сварка применяется для соединения пленки толщиной 12...500 мкм. Мощные лазеры позволяют сваривать листы толщиной до 250 мм.

Другим методом получения неразъемного соединения материалов на основе полимеров является склеивание. Склеивание позволяет получать соединения разнородных материалов (например, металл — пластмасса, пластмасса — керамика и др.).

Склеивание эффективно используют в промышленности (например, для соединения фрикционных накладок с тормозными колодками автомобилей).

Для склейки отвержденных реактопластов применяют термореактивные клеи.

Термопласты по отношению к склеиванию можно разделить на следующие:

- 1) легко склеиваемые (органическое стекло, полистирол, поликарбонат, непластифицированный поливинилхлорид);
- 2) условно легко склеиваемые (пластифицированный поливинилхлорид, полиэтилентерефталат);
- 3) трудно склеиваемые (полиэтилен, полипропилен, фторопласт, полиамиды, полиформальдегид).

Для легко склеиваемых пластмасс требуется несложная подготовка поверхностей, для трудно склеиваемых — специальная подготовка (например, фторопласт-4 обрабатывают раствором натрия в жидком аммиаке).

3.8. ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

Применение пластмасс в конструкциях машин, в первую очередь, диктуется техническими соображениями, но при этом важную роль играет и экономическая целесообразность.

Так, пластмассы обладают рядом положительных характеристик:

1) низкой стоимостью (по сравнению с металлами или другими материалами);

2) малой плотностью (плотность большинства пластмасс составляет 900...2200 кг/м³, что примерно в 5..8 раз ниже, чем плотность стали);

3) значительной удельной объемной прочностью;

4) хорошими электро-, тепло- и звукоизоляционными свойствами;

5) высокой технологичностью;

6) стойкостью к различным агрессивным средам (в отличие от металлов пластмассы обладают повышенной стойкостью к воздействию кислот, щелочей, солей и растворителей);

7) возможностью придания выраженных антифрикционных или фрикционных свойств;

8) прозрачностью и способностью окрашиваться;

9) устойчивостью к вибрациям.

Следует отметить, что в зависимости от соотношения компонентов, используемых для производства пластмасс и технологического режима, можно получить материалы с заданными свойствами.

После длительного действия на пластмассы постоянной нагрузки их прочность снижается. Поэтому они не применяются там, где на них действуют в процессе эксплуатации постоянные (хотя и допускаемые) нагрузки. При этом (благодаря своей эластичности) пластмассы лучше, чем металлы, выдерживают переменные нагрузки.

Предел прочности и модуль упругости у пластмасс значительно меньше, чем у сталей. По этой причине пластмассы не используются там, где требуется высокая жесткость изделий. Для повышения жесткости пластмассовые детали иногда армируют металлом. У одной из наиболее прочных пластмасс — стеклопластика предел прочности при растяжении достигает 700 МПа.

Пластмассы могут работать в следующем интервале температур: от -50 до +80 °С (термопласты), до 120 °С (реактопласты), до 500 °С (пластмассы на основе кремнийорганических полимеров и фторопласты). Большинство пластмасс при температуре 250...350 °С подвергается деструкции, т. е. процессу разложения полимера на мономеры и другие вещества (воду, углекислый газ, альдегиды и т. п.). Низкая теплостойкость является главным недостатком пластмасс как конструкционных материалов, поскольку с повышением температуры их прочность уменьшается (рис. 3.17).

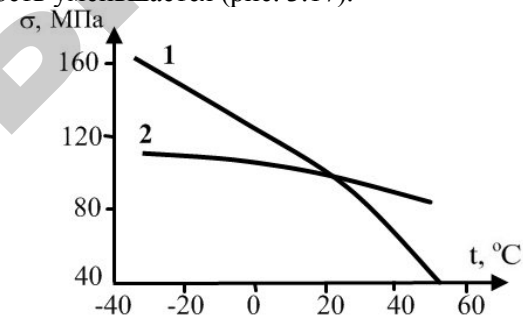


Рис. 3.17. Зависимость прочности пластмасс от температуры:
1 — термопласты; 2 — реактопласты

Морозостойкость пластмасс характеризует изменение их механических свойств, происходящее при отрицательных температурах. Большинство пластмасс при отрицательных температурах (особенно термопласты) теряют пластичность и становятся хрупкими.

Следует отметить, что пластмассы обладают значительно меньшей теплопроводностью, чем металлы (в 500...600 раз).

Пластмассы стареют, т. е. со временем изменяют свои свойства под воздействием теплоты, влаги и света. Основной причиной старения пластмасс является деструкция и окисление полимеров под воздействием солнечных лучей и тепла. Относительная недолговечность пластмасс (по сравнению с металлами) является их серьезным недостатком

Использование пластмасс в автомобилестроении обеспечивает:

1) снижение металлоемкости конструкций;

2) повышение безопасности конструкций (за счет применения полужестких, эластичных пенополиуретанов для изготовления си-

дений, рулевых колес, подлокотников, потолков, панелей приборов, бамперов и других деталей);

3) увеличения долговечности конструкций (за счет использования пластмассовых покрытий деталей, обращенных к полотну дороги, и применения крыльев, фартуков, бамперов и других деталей, изготовленных из пластмасс);

4) сокращение трудоемкости (за счет высокой технологичности пластмасс).

Следует отметить, что наиболее широко применяются такие пластмассы, как полиэтилен, сополимер этилена с винилацетатом, полипропилен, полиамид, поликарбонат. Их используют для изготовления бамперов, дверей, багажников, капотов и проч.

Применение пластмасс значительно сокращает капиталовложения, так как уменьшается трудоемкость проектных работ и потребность в оборудовании. Экономичность применения пластмасс (в производстве) выражается в снижении себестоимости, массы изделия, затрат на материал (материалоемкости), трудоемкости изготовления деталей из пластмасс (по сравнению с металлическими деталями), т. е. уменьшении величины зарплаты на единицу изделия; сокращения производственного цикла, а также сроков проектирования и освоения новых конструкций.

Экономичность применения пластмасс в эксплуатации выражается в снижении массы конструкции, уменьшении эксплуатационных затрат (на смазывание, ремонт и т. д.), повышении эксплуатационной надежности машины, расширении технических возможностей работы конструкции и повышении значений ее технико-экономических параметров (грузоподъемности, КПД, срока службы и т. д.).

Следует отметить, что снижение материалоемкости конструкции и связанная с этим экономия металлов являются важнейшей народнохозяйственной задачей.

Пластмассовые детали снижают материалоемкость в связи с меньшей массой деталей и значительно более высоким коэффициентом полезного использования материала (в среднем $K_{исп} \approx 0,9 \dots 0,95$; т. е. при прессовании $\approx 0,9$; при литье и выдавливании $\approx 0,95$). Затраты на материал составляют 40...75 % всех затрат на изготовление машин, поэтому экономия материала — один из важнейших резервов снижения себестоимости машин. Иногда из-за высокой стоимости некоторых пластмасс снижение массы ма-

териала на конструкцию не приводит к уменьшению затрат на материал, но при этом необходимо учитывать и другие выгоды. Так, при изготовлении металлических деталей требуется три вида обработки (литье, термообработка, механическая обработка) с большим числом операций (до 30...50), а пластмассовых деталей — только один вид обработки (формообразование детали методом пластической деформации).

Таким образом, замена металлических деталей пластмассовыми изделиями в некоторых случаях весьма эффективна. При этом уменьшается масса конструкции (в 4...5 раз); снижается трудоемкость изготовления деталей (примерно в 4...5 раз), а число операций и их трудоемкость уменьшается в 5...6 раз, что сокращает длительность производственного цикла и высвобождает оборотные средства. Капиталовложения (затраты на здания, оборудование, инвентарь) также уменьшаются в 4...6 раз. Себестоимость продукции при этом снижается в 2...3 раза.

Детали из пластмасс дешевле деталей из цветных металлов (в 4...9 раз), а во многих случаях и деталей из черных металлов.

В конструкциях летательных аппаратов, двигателей и приборов пластмассы и другие неметаллические материалы (в среднем) составляют 7...25 % массы дозвуковых транспортных самолетов и до 20...50 % массы ракеты (без топлива).

В сельскохозяйственном машиностроении замена металлокерамических деталей на детали из сополимеров этилена позволяет увеличить срок службы подшипниковых втулок культиваторов в 2,4...3,0 раза. В цементном производстве футеровка сополимерами (взамен стальных листов) увеличивает срок службы бункеров, лотков и желобов в несколько раз. Однако при использовании пластмасс необходимо учитывать их особенности.

Так, на работоспособность пластмассовых деталей большое влияние оказывает процесс их старения.

При длительном нагружении пластмассы склонны к ползучести. Это еще более усугубляет временной характер прочностных свойств пластмасс. Поэтому такие показатели, как предел текучести и предел прочности, которые используются при расчетах металлических конструкций, являются очень условными для пластмасс. В этой связи нельзя решать вопрос о нагрузочной способности пластмассовых деталей, не учитывая времени, в течение которого деталь должна работать.

Некоторые положения, которые должны быть приняты за основу при проектировании пластмассовых изделий, можно сформулировать в виде следующих правил:

1. Детали из пластмасс следует проектировать так, чтобы силовые нагрузки приходились на наиболее прочные сечения, т. е. с учетом направления волокон наполнителя или ориентации макромолекул полимера.

2. Не рекомендуется изготавливать из пластмасс детали, которые в процессе эксплуатации длительно подвергаются постоянным нагрузкам (хотя и допускаемым). Пластмассовые детали работают лучше в условиях действия кратковременных нагрузок.

3. При проектировании деталей из пластмасс следует учесть их ограниченную жесткость, для повышения которой следует предусмотреть ребра жесткости или арматуру.

4. Проектировать из пластмассы можно только такие детали, которые будут работать в оптимальном для данной пластмассы температурном режиме с учетом возможного влияния нагружения на термические характеристики материала.

5. Пластмассы не могут быть использованы для изготовления деталей, которые работают при значительных нагрузках и от которых требуется повышенная точность размеров.

Изготовление изделий с покрытиями из пластмасс позволило использовать сочетание положительных свойств, как пластмасс, так и других материалов для улучшения эксплуатационных характеристик изготавливаемых деталей. Металлические предметы с нанесенным на них покрытием из полимеров сочетают высокую прочность, присущую металлам, и положительные свойства полимеров. Особенно эффективно использование таких покрытий тогда, когда при этом удается заменить дефицитные и дорогие металлы (цветные сплавы, высоколегированные стали) дешевыми углеродистыми сталями.

Водостойкие покрытия применяются для деревянных, картонных, пенопластмассовых, пенобетонных и других изделий.

Поскольку кремнийорганические покрытия не смачиваются водой, то ими покрывают стекла окон транспортных средств. Капли дождя скатываются с таких покрытий, не растекаясь по стеклу, благодаря чему сохраняется хорошая видимость.

С учетом их технологичности и относительно небольшой стоимости пластмассы широко используются для изготовления

изделий «одноразового» пользования (упаковка, посуда, ручки и т. д.). При этом происходит интенсивное засорение окружающей среды полимерами и, как следствие, утилизация отходов изделий из пластмасс становится актуальной проблемой для всех стран. Для оказания помощи при утилизации одноразовых предметов, в 1988 году Обществом Пластмассовой Промышленности была разработана система маркировки для всех видов пластика и идентификационные коды. Маркировка пластика состоит из 3-х стрелок в форме треугольника, внутри которого находится цифра, обозначающая тип пластика (рис. 3.18).

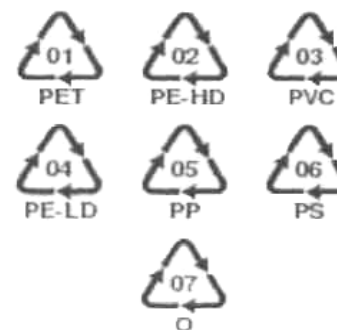


Рис. 3.18. Идентификация пластмасс

Маркировка обозначает следующее:

а) 01. PET или PETE — полиэтилентерефталат. Обычно используется для изготовления бутылок (минеральной воды, безалкогольные напитки и фруктовые соки), упаковки, обивки. Такие пластики являются потенциально опасными для пищевого использования;

б) 02. PEHD или HDPE — полиэтилен высокой плотности. Из него изготавливаются некоторые бутылки, фляги, а также полужесткая упаковка. Считаются безопасными для пищевого использования;

в) 03. ПВХ или PVC — поливинилхлорид. Используется для производства труб, трубок, садовой мебели, оконных профилей, жалюзи, бутылок моющих средств, клеенки и в напольных покрытиях. Материал является потенциально опасными для пищевого использования, поскольку может содержать диоксины, бисфенол А, ртуть, кадмий;

г) 04. LDPE и PEVD — полиэтилен низкой плотности. Используется для производства брезента, мусорных мешков, пакетов,

пленки и гибких емкостей. Считается безопасным для пищевого использования;

д) 05. PP — полипропилен. Используется в автомобильной промышленности (оборудование, бамперы), при изготовлении игрушек, а также в пищевой промышленности, в основном, при изготовлении упаковок. Считается безопасным для пищевого использования;

е) 06. PS — полистирол. Используется при изготовлении плит теплоизоляции зданий, пищевых упаковок, столовых приборов и чашек, упаковок (пищевой пленки и пеноматериалов), игрушек, посуды, ручек и т. д. Материал является потенциально опасным, особенно в случае горения, поскольку содержит стирол;

ж) 07. OTHER или O — прочие. К этой группе относится любой другой пластик, который не может быть включен в предыдущие группы, и не является токсичным для окружающей среды.

3.9. ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Пленкообразующие материалы — это растворы или расплавы полимеров, а также неорганические вещества, которые наносятся на какую-либо поверхность, а после высыхания (затвердевания) образуют прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам.

К пленкообразующим материалам относятся клеи и герметики. Эти материалы могут быть в виде жидкостей, паст, замазок, пленок. В их состав входят следующие компоненты:

1) пленкообразующее вещество (в основном, термореактивные смолы, каучуки), которое определяет адгезионные и когезионные свойства, а также основные физико-механические характеристики;

2) растворители (спирты, бензин и другие), создающие определенную вязкость;

3) пластификаторы для устранения усадочных явлений в пленке и повышения ее эластичности;

4) отвердители и катализаторы (для перевода пленкообразующего вещества в термостабильное состояние);

5) наполнители в виде минеральных порошков, повышающих прочность соединения и уменьшающих усадку пленки.

Для повышения термостойкости в эти материалы вводят порошки Al, Al₂O₃, SiO₂, а токопроводимости — серебро, медь, никель, графит.

В зависимости от назначения пленкообразующие материалы делят на клеящие, применяемые для склейки различных материалов, и герметики, обеспечивающие уплотнение и герметизацию швов, стыков, емкостей и т. д.

3.9.1. Клеящие материалы

Склеивание — метод получения неразъемного соединения деталей при помощи адгезионного взаимодействия клея с подложкой с последующим твердением клеевой прослойки.

Клеями называют композиции, применяемые для соединения различных материалов за счет образования прочной адгезионной связи между их поверхностями и клеевой прослойкой.

По сравнению с другими видами неразъемных соединений (заклепочными, сварными и другими) *клеевые соединения* имеют следующие преимущества:

1) возможность соединения различных материалов (металлов и сплавов, пластмасс, стекла, керамики и др.) как между собой, так и в различных сочетаниях;

2) атмосферостойкость и стойкость к коррозии клеевого шва;

3) герметичность соединения;

4) возможность соединения тонких материалов;

5) снижение стоимости производства;

6) экономия массы и значительное упрощение технологии изготовления изделий.

Следует отметить, что наиболее эффективно клеевые соединения работают на сдвиг.

Недостатками клеевых соединений являются относительно низкая длительная теплостойкость (до 350 °С), обусловленная органической природой пленкообразующего вещества; невысокая прочность склеивания при неравномерном отрыве; необходимость (во многих случаях) проведения склеивания с подогревом; склонность к старению. Однако имеются примеры длительной эксплуатационной стойкости клеевых соединений. Новые клеи на основе кремнийорганических и неорганических полимеров обеспечивают работу клеевого шва при температуре до 1000 °С и выше, но большинство из них не обладают достаточной эластичностью клеящей пленки.

В этой связи желательна, чтобы прочность клеящей пленки была близка к прочности склеиваемых материалов, так как в этом случае при возникновении критических напряжений разрушение будет происходить по одному из склеиваемых материалов, а не по клеевому соединению.

Прочность склеивания зависит от явления адгезии, когезии и механического сцепления пленки с поверхностью склеиваемых материалов. Следует отметить, что адгезионные свойства металлов различны. По мере убывания этих свойств металлы можно расположить в следующем порядке: сталь, бронза, алюминиевые сплавы, медь, железо, латунь. Прочность склеивания можно повысить путем создания условий для механического сцепления пленки клея с поверхностью материала. При этом на поверхности материала механическим способом создают дополнительные микронеровности.

При склеивании следует учитывать природу склеиваемых материалов. Так, полярные материалы требуют применения полярных клеев. При склеивании пластика лучшим клеем является раствор или расплав этого же пластика. Если пластики не являются полярными и не растворяются в растворителях (полиэтилен, фторопласт-4, полипропилен), то характер поверхности этих пластиков изменяют механическим или химическим путем.

Животные клеи — это продукты переработки кожи и костей животных, чешуи и костей рыб, а также молока. В настоящее время животные клеи имеют очень ограниченное применение. Их используют, в основном, для склеивания бумаги, тканей и дерева.

Основными свойствами клея являются:

- 1) вязкость,
- 2) механическая прочность,
- 3) водостойкость,
- 4) химическая стойкость,
- 5) жизнеспособность,
- 6) горючесть,
- 7) токсичность,
- 8) взрывоопасность.

Следует отметить, что жизнеспособность клея — это время, в течение которого клей, полученный смешиванием непосредственно перед употреблением нескольких компонентов, пригоден для получения необходимого качества клеевого соединения.

Клеи классифицируют по следующим признакам:

- 1) природе пленкообразующего вещества (натуральные, в том числе, животного происхождения, растительные, минеральные, синтетические);
- 2) адгезионным свойствам по отношению к склеиваемому материалу (универсальные, с избирательной адгезией);
- 3) условиям затвердевания (холодное и горячее затвердевание), (водотвердеющие, универсалнотвердеющие);
- 4) форме (твердые, пленки, порошки, прутки; жидкие, растворы, эмульсии; пастообразные);
- 5) возможности последующей деформации клеевого соединения (жесткие и эластичные);
- 6) отношению к нагреву (термопластичные и термореактивные);
- 7) жизнеспособности;
- 8) условиям эксплуатации клеевого соединения (общего назначения, высокопрочные, водостойкие, масло-, бензино- и растворителестойкие, коррозионно-, свето- и температуростойкие, электро- и теплопроводные, электроизоляционные и др.).

Различают следующие клеи:

- 1) по пленкообразующему веществу — смоляные и резиновые;
- 2) по адгезионным свойствам — универсальные, склеивающие различные материалы (например, клеи БФ), и с избирательной адгезией (белковые, резиновые);
- 3) по отношению к нагреву — обратимые (термопластичные) и необратимые (термостабильные) пленки;
- 4) по условиям отверждения — холодного склеивания и горячего склеивания;
- 5) по внешнему виду — жидкие, пастообразные и пленочные;
- 6) по назначению — конструкционные силовые и несиловые.

Чаще всего используют классификацию клеев по пленкообразующему веществу. Клеи могут быть на органической основе (смоляные, резиновые) и неорганической основе.

Конструкционные смоляные и резиновые клеи

Смоляные клеи могут быть термореактивными и термопластичными. Термореактивные смолы дают прочные теплостойкие пленки, применяемые для склеивания силовых конструкций из металлов и неметаллических материалов. Клеи на основе термопластичных

смола (поливинилацетата, акрилатов и других) имеют низкие прочностные характеристики (особенно при нагреве) и применяются для несилевых соединений неметаллических материалов.

В качестве пленкообразующих веществ этой группы клеев применяют терморезистивные смолы, которые отверждаются в присутствии катализаторов и отвердителей при нормальной или повышенной температуре. Клеи холодного склеивания, как правило, обладают недостаточной прочностью (особенно при повышенных температурах). При горячем склеивании происходит более полное отверждение смолы и клеевое соединение приобретает прочность и теплостойкость. Теплостойкость клеев повышают также введением минеральных наполнителей. Термостойкие клеи получают на основе ароматических полимеров, содержащих гетероциклы (полибензимидазолов, полиимидов), а также на основе карборансодержащих полимеров. Карбораны представляют собой бороорганические соединения, имеющие общую формулу $B_nC_2H_{n+2}$, которые по свойствам близки к ароматическим системам. В настоящее время созданы эпоксидные, карборансодержащие фенольные, кремнийорганические и другие клеи.

Клеи могут быть немодифицированными фенолформальдегидными, представляющими композиции из резолов и отвердителей. Эти клеи твердеют при нормальной температуре, а ее повышение ускоряет склеивание. Применяются они для склеивания древесины, древесных пластиков, фанеры. Общим недостатком этих клеев является их гидролизующее действие на целлюлозу древесины и других материалов, приводящее к старению, и, кроме того, образующаяся клеевая пленка (резит) хрупка.

Клеи на основе модифицированных фенолоформальдегидных смол применяют преимущественно для склеивания металлических силовых элементов, конструкций из стеклопластиков и т. п.

Фенолокаучуковые композиции являются эластичными теплостойкими пленками с высокой адгезией к металлам. К этому виду относятся клеи ВК-32-200, ВК-3 и др. Данные клеевые соединения теплостойки и хорошо выдерживают циклические нагрузки. При этом, благодаря эластичности пленки, обеспечивается прочность соединения при неравномерном отрыве. Эти клеи водостойки и могут использоваться в различных климатических условиях.

Фенолополивинилацетатевые композиции наиболее широко используют в клеях БФ. Они представляют собой растворы фенолоформальде-

гидной смолы, совмещенной с поливинилбутиралем (бутваром). Клеи БФ применяют для склеивания металлов, пластмасс, керамики и других твердых материалов. Теплостойкость таких клеевых соединений является низкой, водостойкость — удовлетворительной.

Фенолкремнийорганические клеи содержат в качестве наполнителей асбест, алюминиевый порошок и др. Данные клеи являются термостойкими. Они устойчивы к воде и тропическому климату, обладают хорошей вибростойкостью и длительной прочностью. Клеи ВК-18 и ВК-18М способны работать при температуре 500...600 °С. Клей ВК-18М применяют для склеивания инструментов.

Клеи на основе эпоксидных смол. Отверждение этих клеев происходит с помощью отвердителей без выделения побочных продуктов, что почти не вызывает усадочных явлений в клеевой пленке.

Отверждение смол можно вести как холодным способом, так и горячим. В результате полярности эпоксидные смолы обладают высокой адгезией ко всем материалам. Эпоксидные клеи горячего отверждения являются конструкционными силовыми клеями. Их применяют для склеивания металлов, стеклопластиков, ферритов, керамики. Эпоксидно-кремнийорганические клеи применяют при изготовлении инструментов (для приклеивания режущих частей).

Для всех эпоксидных клеев характерна высокая механическая прочность, атмосферостойкость, устойчивость к топливу и минеральным маслам, высокие диэлектрические свойства.

Различные варианты клеев холодного отверждения используют для склеивания больших вертикальных плоскостей из металлов и пластмасс с различными коэффициентами теплового расширения, для склеивания в воде металлов и стеклопластиков, для устранения вмятин, раковин, трещин при ремонте судов. Быстроотверждающийся клей УП-5-207М стоек к изменению температуры, влажности, вибрации, старению. Такие клеи могут работать при температуре от – 60 до + 40 °С.

Полиуретановые клеи могут быть холодного и горячего отверждения. В состав клея входят полиэфиры, полиизоцианаты и наполнитель (цемент). При смешении компонентов происходит химическая реакция, в результате которой клей затвердевает. Клеи обладают универсальной адгезией (полярные группы NHCO), хорошей вибростойкостью и прочностью при неравномерном отрыве, стойкостью к нефтяным топливам и маслам. К полиуретановым клеям относятся ПУ-2, ВК-5, ВК-И, Лейконат, Вилад. Эти клеи являются токсичными.

Клеи, модифицированные карборансодержащими соединениями, обладают высокой термостойкостью. Карбораны представляют собой борорганические соединения, имеющие общую формулу $B_nC_2H_{n+2}$. Клей ВК-20 выдерживает температуры 350...400 °С (длительное время) и 800 °С (кратковременно), имеет высокую длительную прочность. В настоящее время созданы карборансодержащие фенольные, эпоксидные, кремнийорганические и другие клеи.

Клей циакрин на основе цианоакрилатов марок ЭО № 87 и ЭО № 170 не подвержен старению. При хранении прочность этого клея возрастает.

Клеи на основе кремнийорганических соединений являются теплоустойчивыми. Кремнийорганические полимеры не обладают высокими адгезионными свойствами вследствие блокирования полярной цепи Si–O органическими неполярными радикалами. Поэтому эти соединения часто совмещают с другими смолами. Многие клеи содержат минеральные наполнители. Клеи ВК-2, ВК-8, ВК-15 и другие отверждаются при высокой температуре. Они устойчивы к маслу, бензину, обладают высокими диэлектрическими свойствами, не вызывают коррозии металлов и применяются для склеивания легированных стальных, титановых сплавов, стекло- и асбобластиков, графита, неорганических материалов.

Клеи на основе поликарборансилоксанов обладают стойкостью к термоокислительной деструкции, способны работать при температурах 600 °С (продолжительное время) и при 1200 °С (кратковременно), имеют высокую адгезию к различным материалам.

Клеи на основе гетероциклических полимеров. Полибензимидазольные и полиамидные клеи обладают прочностью, высокой стойкостью к деструкции (термической, термоокислительной и радиационной), химической стойкостью. Клеевые соединения могут работать в течение сотен часов при температуре 300 °С, а также при криогенных температурах. Полибензимидазольный клей выпускают под маркой ПБИ-1К, полиамидный — СП-6. Этими клеями можно склеивать коррозионноустойчивые стали, титановые сплавы, стеклопластики и различные композиционные материалы.

Резиновые клеи, в которых основным пленкообразующим веществом является каучук, отличаются высокой эластичностью. Резиновые клеи предназначены для склеивания резиновых изделий, их крепления к металлу, стеклу и др. Резиновые клеи представляют собой растворы каучуков или резиновых смесей в органических растворителях.

В состав клеев горячей вулканизации входит вулканизирующий агент. Склеивание проводят вулканизацией при температуре 140...150 °С (получаемое соединение подчас не уступает по прочности целому материалу).

При введении в состав клеевой композиции активаторов и ускорителей получают самовулканизирующийся клей (процесс вулканизации протекает при комнатной температуре). Для увеличения адгезии в состав клея вводят синтетические смолы. Соединение получается достаточно прочное, стойкое к воздействию морской воды, масел, топлива.

При необходимости склеивания теплоустойчивых резин на основе кремнийорганического каучука и приклеивания их к металлам применяют клеи, содержащие в своем составе кремнийорганические смолы (клеи КТ-15, МАС-1В). Клеевые соединения могут работать при температурах от – 60 до +200...300 °С.

Неорганические клеи

Неорганические клеи являются высокотемпературными. Клеи (связки) могут быть в виде концентрированных водных растворов неорганических полимеров; в виде твердых порошков, которые сначала плавятся, а потом затвердевают, и в виде дисперсий. Последние затвердевают вследствие химического воздействия порошка и жидкости (клей-цемент) или без химического взаимодействия при высыхании (клеи-пасты).

Применяют следующие виды неорганических клеев: фосфатные, керамические, силикатные.

Фосфатные клеи являются растворами фосфатов. Часто в состав клеев вводят инертные или активные наполнители. Порошки металлов образуют аморфные кислые фосфаты. Клей АХФС (на алюмохромфосфатной связке) отверждается при температуре от 20 до 250 °С и имеет $\rho_v = 1520 \text{ кг/м}^3$, $\sigma_b = 3...10 \text{ МПа}$, $\tau_{сдв} = 0,9...1,4 \text{ МПа}$, огнеупорность 1000...1800 °С. Этот клей водо- и кислотостоек, обладает хорошей адгезией и применяется для склеивания различных металлов, графита и проч. Клей АФС — алюмофосфатная связка с наполнителями ZrO_2 и порошком Ti , после термообработки ($t = 600 \text{ °С}$) имеет $\sigma_{сж} = 250 \text{ МПа}$.

Керамические клеи (фритты) являются тонкими суспензиями оксидов щелочных металлов (MgO , Al_2O_3 , SiO_2 и др.) в воде. Такие

клеи наносятся на склеиваемые поверхности, подсушиваются, а затем при небольшом давлении нагреваются до температуры плавления компонентов и выдерживаются в течение 15...20 мин. Прочность соединения сохраняется при температуре 500...1000 °С.

Силикатные клеи. Жидкое стекло обладает клеящей способностью. Им можно склеивать стекло, керамику, асбест и разнородные материалы (стекло с металлом). Алюмосиликатная связка (АСС) с различными наполнителями образует клеи, отверждающиеся при температуре 120 °С за 1...2 ч. Клеями можно склеивать однородные и разнородные материалы. Прочность соединения металлов $\sigma_{сж} = 45...100$ МПа, $\sigma_{в} = 50...150$ МПа. При введении углеродистого волокна $\sigma_{изг} = 500$ МПа.

Свойства клеевых соединений

Наиболее важными эксплуатационными характеристиками клеев являются их длительная прочность под нагрузкой, стойкость к старению, тепло-, водо- и атмосферостойкость, а также усталостная долговечность.

Клеевые соединения наиболее эффективно работают на сдвиг ($\tau_{сдв} = 6...30$ МПа). В клеевых соединениях могут происходить отрыв (равномерный и неравномерный) и отслаивание клеевой пленки у кромки шва.

Следует отметить, что в случае неравномерного отрыва прочность соединения в несколько раз меньше, чем при равномерном отрыве. При сжатии прочность клеевого соединения в 10...100 раз, чем при растяжении.

Прочность склеивания существенно зависит от температуры, причем большое влияние на прочность соединения оказывает вид клея. При этом коэффициент Пуассона клея $\mu = 0,3$; модуль сдвига $C = 0,38 E$; модуль упругости $E = 2\ 000...4\ 000$ МПа; а удлинение отвержденной пленки составляет около 3,5 %.

Следует отметить, что клеи различаются по теплостойкости. Так, фенолокаучуковые и эпоксидные клеи работают длительно (до 30 000 ч) при температуре 150 °С и выше. Полиароматические и элементоорганические клеи выдерживают температуру 200...400 °С в течение 2 000 часов; карборансодержащие клеи — до 600 °С (в течение сотен часов).

Клеящие материалы со временем «стареют». В условиях эксплуатации и при хранении склеенных изделий наступает охрупчивание клея,

которое протекает тем быстрее, чем выше температура. Увеличение жесткости клея вызывает возрастание концентрации напряжений, из-за чего прочность клеевого соединения уменьшается. При этом самой высокой термостабильностью обладают полиамидные и полибензимидазольные клеи. Вместе с тем некоторые клеи при действии переменных температур теряют 8...20 % прочности.

Выносливость — это число циклов до разрушения клеевого шва, которая зависит от вида клея. При несимметричном цикле нагружения число циклов до разрушения составляет $10^6...10^7$ (в среднем). Следует отметить, что стойкость клеевых соединений к длительному действию нагрузок может быть повышена путем армирования клея волокнистыми наполнителями.

Технология получения клеевых соединений включает операции приготовления клея, подготовки поверхностей, нанесения клея (иногда с выдержкой для удаления растворителя и заполнения рельефа поверхности), приведения соединяемых поверхностей в контакт, отверждения (или затвердевание) клеевого слоя. Клеи обычно наносят на поверхность механическим способом (подобно лакокрасочным материалам). Некоторые термопластичные клеи подают в зазор под давлением из специальных литьевых машин. При отверждении клеевое соединение, как правило, выдерживают под давлением. Клеящие слои образуются также пленками или липкими лентами.

3.9.2. Герметики

Герметики — пастообразные или вязкотекучие массы на основе полимеров и олигомеров, вулканизирующиеся (отверждающиеся) в зазорах конструкций с образованием эластичных прослоек или покрытий, предотвращающих утечки рабочих сред.

Герметики применяют для уплотнения и герметизации клепаных, сварных и резьбовых соединений, топливных отсеков и баков, различных металлических конструкций, приборов, агрегатов в промышленности (авиационной и автомобильной), судостроении, строительной технике. Срок службы этих материалов может длиться до 25 лет.

Основными эксплуатационными характеристиками герметиков являются жизнеспособность (период времени, в течение которого сохраняются их свойства до использования); газонепроницаемость при рабочих температурах и в различных средах; адгезия к герме-

тизируемой поверхности; технологичность и легкость обработки; прочность на разрыв и относительное удлинение при растяжении; плотность после приготовления.

Герметики классифицируют по теплостойкости (50...70 °С, 100...150 °С, свыше 200 °С), стойкости к топливам и маслам, а также по методам нанесения (шпательные, заливочные и т. д.) и товарному виду (формованные и неформованные).

По составу герметиков их разделяют на *каучуковые, смоляные и каучуково-смоляные*.

В зависимости от природы исходного полимера различают герметики вулканизирующиеся и отверждающиеся, невысыхающие и высыхающие.

Тиоколовые герметики получают на основе полисульфидного каучука. Они стойки к топливу и маслам. При этом сера, входящая в состав основной молекулярной цепи, сообщает пленке высокую газо- и паронепроницаемость. Это наиболее распространенные каучуковые герметики, которые обладают высокой адгезией к металлам, древесине, бетону.

К *смоляным герметикам* относятся анаэробные, кремнийорганические, эпоксидные и др.

Анаэробные герметики (анатерм и унигерм) получают на основе полиакрилатов. Эти герметики за рубежом называются локтайдами. При отверждении они не дают усадки и не требуют больших давлений. Пленка герметиков стойка к вибрации и ударам. Данные материалы могут работать в агрессивных средах и при высоких давлениях, при температурах от –200 до +200 °С (длительно), и до 300 °С (кратковременно). Прочность соединения при сдвиге (в случае использования анатерма) составляет 6...17,5 МПа.

Анаэробные герметики применяют для герметизации микродефектов в сварных соединениях, отливках, штампованных деталях, герметизации резьбовых соединений, трубопроводов и др. Недостатком этих герметиков является их высокая стоимость.

Кремнийорганические герметики отличаются повышенной теплостойкостью. Их представителями являются Висксинт и Эластоксил.

Висксинт применяется для поверхностной герметизации металлических соединений, электро- и радиоаппаратуры, внутришовных клепаных и сварных соединений. Он может работать при температуре от –60 до +250 °С; демонстрирует стойкость в различных климатических условиях; выдерживает вибрацию и удары.

Эластоксил применяется для герметизации металлов, органических и силикатных стекол, керамики, бетона. Этот материал водо-, тепло-, атмосферостоек при температуре от –60 до +200 °С и является диэлектриком.

Эпоксидные герметики бывают холодного и горячего отверждения и работают в условиях тропической влажности, при вибрационных и ударных нагрузках. Эти герметики применяются для герметизации металлических и стеклопластиковых изделий. Герметики холодного отверждения могут длительное время работать при температурах от –60 до +75 °С, горячего — от –60 до +140 °С.

Фторкаучуковые герметики относятся к каучуково-смоляным. Они тепло-, масло-, топливостойки и работают в агрессивных средах. Основой этих герметиков служат низко- и среднемолекулярные каучуки (Ф-4Д, СКФ-26 и др.), которые имеют исключительно высокие герметизирующие свойства, кислото- и паростойкость.

Эти материалы не горят и могут работать при температурах 250 °С (длительно) и 300 °С (100...200 часов). Такие герметики выпускаются под марками СКФ-260НМ, СКФ-260НМ-2 и др.

Недостатком данных материалов является их неудовлетворительная морозостойкость (–22 °С), хотя они и не растрескиваются даже при температуре до –60 °С. Кроме того, они нестойки к большинству тормозных жидкостей; недостаточно пластичны и имеют высокую стоимость. Основное применение фторкаучуковые герметики находят в промышленности (автомобильной и авиационной).

К *полиуретановым герметикам* относится Вилад-13-2М, к *полиэфирным* — ПН-33, который является герметиком холодного отверждения и используется для герметизации металлических отливок. Свойства герметика: $\sigma_{\text{в}} = 10...15$ МПа, $\sigma_{\text{изг}} = 15...21$ МПа, $a = 5...10$ кДж/м².

В зависимости от состояния, в котором герметизирующие материалы вводят в шов, они подразделяются на мастичные, погонажные (эластичные прокладки), и оклеечные (ленты) герметики.

Мастичные герметики делятся на три группы. К первой группе относятся полимерные нетвердеющие мастики на основе полиизобутилена. Они работают в конструкции в том состоянии, в каком уложены в нее. Ко второй группе относятся эластомеры холодного твердения (тиоколовые, бутилкаучуковые, силиконовые), которые после введения в пастообразном состоянии встык под влиянием вулканизирующих добавок при тем-

пературе окружающей среды переходят в эластичное резиноподобное состояние. В третью группу входят битумно-полимерные герметики, применяемые в горячем виде.

Погонажные герметики представляют собой пористые или пустотелые элементы, выполненные из различных резиновых смесей (пороизол, гернит и другие), в виде жгутов разного поперечного сечения. Использование этих герметиков эффективно при их определенном (не менее 30...50 % диаметра) обжати в стыках.

Оклеечные (рулонные) герметики представляют собой полосы из стеклоткани, с нанесенным на них герметизирующим слоем мастики.

К группе герметиков специального назначения относятся *компаунды* — полимерные композиции на основе различных полимеров или мономеров, предназначенные для заливки или пропитки токопроводящих схем и деталей с целью их изоляции в электро- и радиоаппаратуре. Компаунды не содержат растворителей. Они могут быть термореактивными (на основе эпоксидных, полиэфирных и других смол) и термопластичными (на основе битумов, воскообразных диэлектриков и термопластичных полимеров — полистирола, полиизобутилена и др.). Наибольшей теплостойкостью обладают эпоксидные и кремнийорганические компаунды.

По степени упругости герметики разделяют на эластичные, пластичные, эластопластичные и пластозэластичные.

Процесс герметизации включает приготовление герметика, подготовку поверхности деталей или узлов, нанесение герметика, его вулканизацию или отверждение. Герметизация может быть внутренней или поверхностной (в этом случае герметик выполняет функции защитного покрытия).

3.10. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Керамика (керамические материалы) — поликристаллические материалы, получаемые спеканием глин и их смесей с минеральными добавками, а также оксидов металлов и других тугоплавких соединений. Люди начали использовать керамические материалы с 5-го тысячелетия до н. э.

Техническая керамика включает искусственно синтезированные керамические материалы различного состава (химического и фазо-

вого). Основными компонентами технической керамики являются оксиды, бескислородные соединения металлов, а также глины.

Следует отметить, что любой керамический материал является многофазной системой. В керамике могут присутствовать кристаллическая, стекловидная и газовая фазы.

Кристаллическая фаза представляет собой определенные химические соединения или твердые растворы. Эта фаза составляет основу керамики и определяет значения ее механической прочности, термостойкости и других основных свойств.

Стекловидная фаза находится в керамике в виде прослоек стекла, связывающих кристаллическую фазу. Обычно керамика содержит 1...10 % стекловидной фазы, которая снижает механическую прочность и ухудшает тепловые показатели материала. Однако стеклообразующие компоненты (глинистые вещества) облегчают технологию изготовления изделий.

Газовая фаза представляет собой газы, находящиеся в порах керамики. По этой фазе керамику подразделяют на плотную, без открытых пор и пористую. Наличие даже закрытых пор нежелательно, так как из-за этого снижается механическая прочность материала.

Техническая керамика характеризуется многообразием составов и свойств. Поскольку различные виды керамики отличаются сырьем, составом, структурой и свойствами, то объединяющим признаком этих материалов можно считать технологию их получения (составление шихты, формование и обжиг).

Керамические материалы характеризуются общими для них свойствами (высокая температура плавления, большие значения твердости и модуля упругости, химическая инертность). При этом данные материалы отличаются большим диапазоном электрических и тепловых свойств (от сверхпроводников до диэлектриков, от теплоизоляторов до высокотеплопроводящих материалов), обладают специфическими свойствами (эмиссионными, оптическими, ядерными, каталитическими). Из керамики изготавливают украшения, строительные материалы (в том числе облицовочную плитку и кирпич), посуду (фарфоровую и глиняную), футеровку печей, режущий инструмент, детали химического и металлургического оборудования, уплотнители насосов, работающих в условиях абразивного изнашивания, детали двигателей (внутреннего сгорания и газотурбинных) и ракет и др.

Большинство керамических материалов являются кислородсодержащими соединениями. К ним относятся силикатные соединения (на основе глин и других силикатов) и из чистых тугоплавких оксидов металлов (оксидов бериллия, магния, алюминия, циркония, гафния и проч.).

К бескислородным соединениям принадлежат керамические материалы, состоящие из карбидов, нитридов, боридов, силицидов и др.

Различают керамические материалы пористые и плотные (каменная керамика); грубые (с неоднородным строением) и тонкие (с мелкокристаллическим строением).

Керамика на основе оксида алюминия Al_2O_3 (корундовая) обладает высокой прочностью, которая сохраняется при высоких температурах. Корундовая керамика химически стойка и является отличным диэлектриком. Изделия из этого материала применяют во многих областях техники (пластины резцов, используемые при больших скоростях резания, калибры, фильеры для протяжки стальной проволоки, сопла, детали высокотемпературных печей, подшипники печных конвейеров, детали насосов, свечи зажигания в двигателях внутреннего сгорания). Керамику на основе оксида алюминия с плотной структурой используют в качестве вакуумной, а пористую — как термоизоляционный материал. В корундовых тиглях плавят различные металлы, оксиды, шлаки.

Особенностями *оксида циркония* (ZrO_2) являются слабокислотная или инертная природа и низкий коэффициент теплопроводности. Рекомендуемые температуры применения керамики из ZrO_2 2 000...2 200 °С; она используется для изготовления огнеупорных тиглей для плавки металлов и сплавов, как тепловая изоляция печей, аппаратов и реакторов, в качестве покрытия на металлах для защиты последних от действия температур.

Керамика на основе оксидов магния и кальция обладает стойкостью к действию основных шлаков различных металлов, в том числе и щелочных. Но термическая стойкость таких материалов низкая. Оксид магния при высоких температурах летуч, а оксид кальция способен к гидратации даже на воздухе (их применяют для изготовления тиглей). Кроме того, MgO используют для футеровки печей, пирометрической аппаратуры и т. д.

Керамика на основе оксида бериллия отличается высокой теплопроводностью, что сообщает этому материалу высокую термостой-

кость, но его прочностные свойства невысокие. Оксид бериллия обладает способностью рассеивать ионизирующее излучение высоких энергий, имеет высокий коэффициент замедления тепловых нейтронов и применяется для изготовления тиглей для плавки некоторых чистых металлов, а также в качестве вакуумной керамики в ядерных реакторах.

Следует отметить, что разработаны и используются керамические материалы на основе оксидов титана, тория, урана и др.

Бескислородная керамика создана на основе соединений, которые не содержат кислорода. К ним относятся соединения элементов с углеродом (MeC) — карбиды, с азотом (MeN) — нитриды, с бором (MeB) — бориды, с кремнием ($MeSi$) — силициды и с серой (MeS) — сульфиды. Эти соединения отличаются высокой огнеупорностью (2 500...3 500 °С), твердостью (иногда как у алмаза) и износостойкостью (по отношению к агрессивным средам). При этом материалы обладают высокой хрупкостью. Сопротивление окислению при высоких температурах (окалиностойкость) карбидов и боридов составляет 900...1 000 °С, у нитридов — несколько ниже. Силициды могут выдерживать температуру 1 300...1 700 °С (на поверхности образуется пленка кремнезема).

Карбиды кремния, хрома, титана, вольфрама и другие получили широкое применение. Из карбида кремния изготавливают огнеупоры, конструкционные материалы, абразивные материалы, электротехнические материалы и др. Из карбида титана изготавливают детали насосов химической промышленности, лопатки газовых турбин, электроды, твердые сплавы и др. Карбид вольфрама используется, в основном, для производства твердых сплавов для резцов, фрез и другого инструмента.

Нитриды — соединения азота с более электроположительными элементами, главным образом, металлами. Тугоплавкими соединениями с высокой твердостью, хорошими износостойкостью и химической стойкостью являются нитриды алюминия, бора, кремния, титана.

Нитрид алюминия обладает еще и хорошими электроизоляционными свойствами. Его используют в качестве электроизоляционного материала, огнеупора (тигли, футеровка печей), из него изготавливают усы (для армирования композиционных материалов). Механические свойства сверхтвердых модификаций нитрида бора

близки к свойствам алмаза. Они используются для изготовления инструментальных материалов и сверхтвердых материалов типа «боразон», «гексанит», «эльбор». Нитрид кремния используется в качестве инструментального материала, конструкционного материала, материала трения, огнеупора. Нитрид титана используется для нанесения покрытий на поверхности изложниц и как декоративное покрытие золотистого цвета. Нитриды молибдена и ниобия при определенных температурах являются сверхпроводниками.

Бориды обладают металлическими свойствами. Они износостойки, тверды, стойки к окислению и электропроводность боридов очень высокая. В технике используются дибориды тугоплавких металлов (TiB_2 , ZrB_2 и др.). Их легируют кремнием или дисилицидами, что делает их устойчивыми до температуры плавления. Диборид циркония стоек в расплавах алюминия, меди, чугуна, стали и др. Его используют для изготовления термопар, работающих при температуре свыше $2\ 000\ ^\circ C$ в агрессивных средах, а также труб, емкостей, тиглей. Благодаря высокому уровню механических свойств, жаропрочности и жаростойкости бориды широко используются как конструкционные материалы для узлов и деталей газовых турбин, реактивных двигателей, для сопел распыления металлов, чехлов термопар и др.

Силициды отличаются от карбидов и боридов полупроводниковыми свойствами, окислостойкостью, стойкостью к действию кислот и щелочей. Эти материалы можно применять при температуре $1\ 300\ \dots\ 1\ 700\ ^\circ C$, при температуре $1\ 000\ ^\circ C$ они не взаимодействуют с расплавленным свинцом, оловом и натрием. Дисилицид молибдена ($MoSi_2$) наиболее широко используется в качестве стабильного электронагревателя в печах при температуре $1\ 700\ ^\circ C$ в течение нескольких тысяч часов. Из спеченного $MoSi_2$ изготавливают лопатки газовых турбин, сопловые вкладыши двигателей. В радио- и электротехнике силициды используют как высокотемпературные полупроводниковые материалы.

Сульфиды (в зависимости от соотношения серы и металла в соединении) являются обычными полупроводниками, узкозонными полупроводниками или обладают свойствами металлов. Эти материалы используются в электротехнике и электронике. Сульфидам присуща высокая химическая стойкость по отношению к расплавам металлов и солей при высоких температурах. Сульфиды применя-

ются в качестве огнеупоров для тиглей и других изделий в прецизионной металлургии, а в химической промышленности их используют как катализаторы.

Следует отметить, что разрабатываются новые составы керамических материалов, совершенствуются технологии получения изделий из этих материалов и область их применения постоянно расширяется.

3.11. НЕОРГАНИЧЕСКОЕ СТЕКЛО

Неорганическое стекло следует рассматривать как затвердевший раствор особого вида — сложный расплав высокой вязкости кислотных и основных оксидов.

Стеклообразное состояние является разновидностью аморфного состояния вещества. При переходе стекла из расплавленного жидкого состояния в твердое аморфное в процессе быстрого охлаждения и нарастания вязкости беспорядочная структура, свойственная жидкому состоянию, как бы «замораживается». В связи с этим неорганические стекла характеризуются неупорядоченностью и неоднородностью внутреннего строения. Большинство стекол имеет рыхлую структуру с внутренней неоднородностью и поверхностными дефектами.

В состав неорганических стекол входят стеклообразующие оксиды, образующие структурную сетку, и модифицирующие оксиды натрия, калия, лития, кальция, магния, бария, изменяющие физико-химические свойства стекломассы.

Следует отметить, что к стеклообразующим оксидам относятся оксиды кремния, бора, фосфора, германия, мышьяка. Кроме того, в состав стекла вводят оксиды алюминия, железа, свинца, титана, бериллия и другие, которые самостоятельно не образуют структурный каркас, но могут частично замещать стеклообразующие оксиды и этим сообщать стеклу нужные технические характеристики. В этой связи промышленные стекла являются сложными многокомпонентными системами.

Стекла классифицируют по стеклообразующему веществу, по содержанию модификаторов и по назначению.

В зависимости от химической природы стеклообразующего вещества стекла подразделяют на силикатные (SiO_2), алюмосиликатные

($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$), боросиликатные ($\text{B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$), алюмоборосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$), алюмофосфатные ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--P}_2\text{O}_5$) и др.

Наиболее широко применяется силикатное стекло, основным компонентом которого является диоксид кремния (SiO_2). Чистый диоксид кремния в стеклообразном состоянии (кварцевое стекло) имеет каркас из тетраэдров (SiO_4)⁴, соединенных вершинами. Расстояния между узлами меняются в широких пределах, поэтому образуется неупорядоченная пространственная сетка (рис. 3.19, а). Частичное замещение кремния на алюминий или бор приводит к образованию каркаса алюмосиликатного или боросиликатного стекла. Катионы щелочных и щелочно-земельных металлов (Na, K, Ca, Mg, Ba) — модификаторы — располагаются между кремнекислородными тетраэдрами, не нарушая структуры каркаса (рис. 3.19, б).

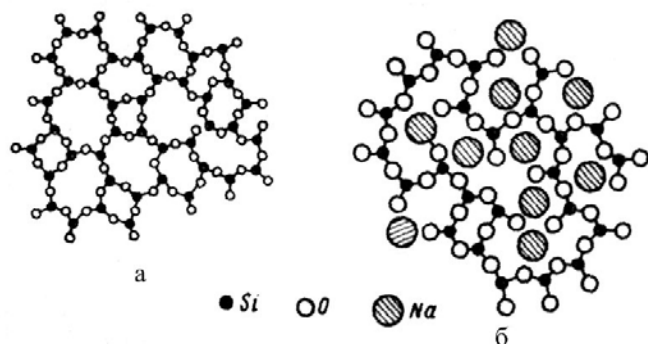


Рис. 3.19. Структура неорганического стекла:
а — кварцевого; б — щелочного

По содержанию модификаторов стекла бывают щелочными (содержащими оксиды Na_2O , K_2O), бесщелочными и кварцевыми.

При этом широкое распространение получили многокомпонентные силикатные стекла системы $\text{Na}_2\text{O—CaO—SiO}_2$ с добавлением Al_2O_3 и MgO .

Кварцевое стекло получают плавлением природного или синтетического кварца. Технология получения стекол включает составление шихты и ее варку в печах.

По назначению неорганические стекла подразделяются на следующие:

1) технические (оптические, светотехнические, электротехнические, химико-лабораторные, приборные, трубные);

2) строительные (оконные, витринные, армированные, стеклоблоки);

3) бытовые (стеклотара; посуда, бытовые зеркала и т. п.).

Техническое стекло по области применения делится на электротехническое, транспортное, оптическое, светотехническое, терmostойкое, тугоплавкое, легкоплавкое, химико-лабораторное и др.

Технические стекла, в основном, относятся к алюмоборосиликатной группе и отличаются разнообразием входящих оксидов. Стекла выпускаются промышленностью в виде готовых изделий, заготовок или отдельных деталей.

Состав распространенных стекол следующий:

1) листовое силикатное тянутое (72 % SiO_2 , 1,5 % Al_2O_3 , 7 % CaO , 4 % MgO , 14 % Na_2O , 2 % K_2O);

2) кварцевое (> 99,6 % SiO_2);

3) свинцовый хрусталь (57 % SiO_2 , 18...36 % PbO , ≤ 3 % BaO , ≤ 3 % ZnO , ≤ 7 % Na_2O , 7...12 % K_2O);

4) прозрачное для рентгеновских лучей стекло Линдемана (64...83 % B_2O_3 , 5...15 % BeO , 12...21 % Li_2O);

5) прозрачное для ультрафиолетовых лучей стекло «Викор» (94 % SiO_2 , 6 % B_2O_3).

При нагреве стекло плавится в некотором температурном интервале, который зависит от состава этого стекла. Ниже температуры стеклования t_c стекло приобретает хрупкость. Для промышленных силикатных стекол температура стеклования $t_c = 425\text{...}600$ °С, температура размягчения $t_p = 600\text{...}800$ °С. В интервале температур между t_c и t_p стекла находятся в высоковязком пластическом состоянии. При температуре выше t_p (1 000...1 100 °С) осуществляются все технологические процессы переработки стекломассы в изделия. Свойства стекла (как и всех аморфных тел) изотропны. Плотность стекла колеблется от 2 200 до 6 500 кг/м³ (для стекла с оксидами свинца или бария она может достигать 8 000 кг/м³).

Механические свойства стекла характеризуются высоким сопротивлением сжатию (500...2 000 МПа), низким пределом прочности (30...90 МПа при растяжении и 50...150 МПа при изгибе), высоким модулем упругости (45...100 МПа), а коэффициент Пуассона $\mu = 0,184\text{...}0,26$. Теоретическая прочность стекла (на молекулярном уровне) в 200...500 раз больше реальной прочности. Чтобы приблизить реальную прочность стекла к значению теоретической прочно-

сти, необходимо совершенствовать технологию изготовления и совершенствовать состав материалов стекла. Наиболее высокие механические свойства обеспечиваются у стекол толщиной 5...100 мкм и волокон диаметром 0,2...40 мкм. Твердость стекла (как и других неорганических материалов) часто определяется приближенным методом царапания по минералогической шкале Мооса и равна 5...7 единицам (за 10 единиц принята твердость алмаза, за единицу — талька). Стекло является хрупким материалом, его ударная вязкость низкая (1,5...2,5 кДж/м²). Более высокие механические характеристики имеют стекла, в составе которых отсутствуют щелочи, и кварцевые. Важнейшими специфическими свойствами стекол являются оптические (светопрозрачность, отражение, рассеяние, поглощение и преломление света). Обычное неокрашенное листовое стекло пропускает до 90 %, отражает примерно 8 % и поглощает около 1 % видимого и частично инфракрасного света, а ультрафиолетовое излучение такое стекло поглощает почти полностью (кварцевое стекло является прозрачным для ультрафиолетового излучения). Коэффициент преломления стекол составляет 1,47...1,96, коэффициент рассеяния (дисперсии) находится в интервале 20...71. Стекло с большим содержанием PbO поглощает рентгеновское излучение.

Листовое стекло получают вытягиванием стекломассы в узкую щель. Стекланные блоки и изделия чаще всего получают прессованием и объемной штамповкой. Для производства полых изделий применяют метод выдувания стекла.

Термостойкость стекла характеризует его долговечность в разных условиях изменения температуры и определяется разностью температур, которую стекло может выдержать без разрушения при его резком охлаждении в воде ($t = 0$ °С). Термостойкость стекла вычисляют по формуле Г. М. Бартенева:

$$\Delta T = K \frac{\sigma_{\text{изг}}(1-\mu)}{\alpha E},$$

где ΔT — разность температур, °С; K — коэффициент (при охлаждении всего изделия $K = 1$); $\sigma_{\text{изг}}$ — предел прочности при изгибе; μ — коэффициент Пуассона; α — температурный коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости.

Коэффициент линейного расширения (α) стекла составляет от $5,6 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ (кварцевое) до $90 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ (строительное), коэффициент теплопроводности — $0,7 \dots 1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Для большинства видов стекол значения термостойкости колеблются от 90 до 170 °С, а для кварцевого стекла она составляет 800...1 000 °С. Химическая стойкость стекла зависит от образующих его компонентов: оксиды SiO₂, ZrO₂, TiO₂, B₂O₅, Al₂O₃, CaO, MgO, ZnO обеспечивают высокую химическую стойкость, а оксиды Li₂O, Na₂O, K₂O, BaO и PbO, наоборот, способствуют химической коррозии стекла. Механическая прочность и термостойкость стекла могут быть повышены путем закалки и термического упрочнения.

Закалка заключается в нагреве стекла до температуры выше значения t_c и последующем быстром и равномерном охлаждении в потоке воздуха или в масле. При этом сопротивление стекла статическим нагрузкам увеличивается в 3...6 раз, а ударная вязкость — в 5...7 раз. При закалке стекла повышается также его термостойкость.

Термохимическое упрочнение основано на значительном изменении структуры стекла и свойств его поверхности. Стекло подвергается закалке в подогретых кремнийорганических жидкостях, в результате чего на поверхности материала образуются полимерные пленки. Этим создается дополнительное (по сравнению с результатом обычной закалки) упрочнение. Повышение прочности и термостойкости можно получить травлением закаленного стекла плавиковой кислотой, в результате чего удаляются поверхностные дефекты, снижающие его качество.

Стекло поддается механической обработке (его можно пилить, обрабатывать, резать, шлифовать, полировать) специальным инструментом:

Применение технических стекол

Для остекления транспортных средств используют преимущественно триплексы, термопан и закаленные стекла.

Триплекс — композиционный материал, получаемый из двух листов закаленного силикатного стекла толщиной 2...3 мм, склеенных прозрачной эластичной полимерной пленкой (обычно из поливинилбутирала). При разрушении триплекса неострые осколки удерживаются на полимерной пленке. Триплексы бывают плоскими и гнутыми.

Термопан — трехслойное стекло из двух листов закаленных стекол и воздушного промежутка между ними, который обеспечивает теплоизоляцию.

Оптические стекла, применяемые в оптических приборах и инструментах, подразделяют на кроны, отличающиеся малым значением коэффициента преломления, и флинты, которые характеризуются высоким содержанием оксида свинца и большими значениями коэффициента преломления. Тяжелые флинты не пропускают рентгеновские лучи и γ -излучение.

Светорассеивающие стекла содержат в своем составе фтор.

Остекление кабин и помещений, где находятся пульта управления мартеновских и дуговых печей, прокатных станков и подъемных кранов в литейных цехах, выполняется стеклами, содержащими оксиды железа и ванадия, которые поглощают около 70 % инфракрасного излучения в интервале длин волн 0,7...3 мкм.

Кварцевое стекло вследствие его высокой стойкости (термической и химической) применяют для изготовления тиглей, чаш, труб, наконечников, лабораторной посуды. Близкое по свойствам к кварцевому стеклу, но более технологичное кварцоидное (кремнеземное) стекло используют для электроколб, форм для точного литья и т. д. Электропроводящие (полупроводниковые) стекла (халькогенидные и оксидные ванадиевые) применяются в качестве термисторов, фотосопровителений.

В промышленности (химической и пищевой) вместо труб из нержавеющей стали и цветных металлов используют термостойкие трубы, изготовленные из безборного стекла.

Стекловолоконные материалы

Теплозвукоизоляционные стекловолоконные материалы имеют рыхловолоконную структуру с большим числом воздушных прослоек, волокна в которых располагаются беспорядочно. Благодаря такой структуре, эти материалы имеют малую объемную массу (20...130 кг/м³) и низкую теплопроводность $\lambda = 0,030...0,0488$ Вт/(м·К).

Стекловолоконное волокно получают следующими способами: штабиковым (образующаяся на конце нагретого штабика капля падает, вытягивая из штабика нить); фильерным (стекловолоконно вытягивают из расплава через фильеру); фильерно-центробежным; дутьевым.

Разновидностями стекловолоконных материалов являются стекловата, применение которой ограничено ее хрупкостью. Стекловаты — это материалы АСИМ, АТИМС, АТМ-3, состоящие из стекловолокон, расположенных между двумя слоями стеклоткани или стеклосетки, про-

стеганной стеклотканью. Эти материалы применяются в интервале температур от -60 до $+600$ °С. Иногда стекловолокна сочетают с термореактивной смолой, придающей материалам (матам) более устойчивую рыхлую структуру (материал АТИМС). Такие материалы работают при температуре до 150 °С.

Материалы, вырабатываемые из короткого волокна и синтетических смол, называются плитами. Коэффициент звукопоглощения плит при частоте звуковых колебаний 200...800 Гц равен 0,5; при частоте 8 000 Гц — 0,65.

Стекловолоконные волокна и стеклоткани используются в качестве наполнителей при производстве стеклопластиков.

Стекловату, маты, плиты применяют для теплозвукоизоляции кабин самолетов, кузовов автомашин, железнодорожных вагонов, тепловозов, электровагонов, корпусов судов, а также в холодильной технике. Этими материалами изолируют различные трубопроводы, автоклавы и т. д.

Ситаллы (стеклокристаллические материалы)

Для повышения прочности стекла стремятся избежать его кристаллизации, приводящей к неоднородности структуры материала. Однако если такая кристаллизация протекает в контролируемых условиях и окончательная структура материала состоит из микрокристаллических частиц, равномерно распределенных в стеклообразной массе, то он приобретает комплекс новых свойств.

Материалы, получаемые управляемой кристаллизацией неорганического стекла, называют *стеклокристаллическими* или *ситаллами*. Процесс кристаллизации стекла в ситаллах доводится до конца, так что остаточное содержание некристаллической фазы составляет не более нескольких процентов. Размер кристаллов в ситаллах составляет 1...2 мкм, толщина некристаллических прослоек — несколько десятых микрометра. Для изготовления ситаллов используют те же компоненты, что и для стекол, а также добавки — катализаторы (нуклеаторы). Основу ситаллов составляют оксиды (Li_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO и прочие), а в качестве нуклеаторов применяются соли светочувствительных металлов (Au , Ag , Cu), которые являются коллоидными красителями и находятся в стекле в виде мельчайших коллоидно-дисперсных частиц, а также фтористые и фосфатные соединения, TiO_2 и другие, представляющие собой центры кристаллизации, распределяющиеся в стекле в виде плохо растворимых частичек.

После плавления шихты для ситаллов и изделий, получаемых по обычной технологии, производят ее повторный нагрев до температуры стеклования (400...600 °С). При этой температуре происходит образование кристаллов, которые зарождаются на центрах кристаллизации. Время выдержки изделия при температуре стеклования выбирают таким, чтобы получить максимальный объем кристаллической фазы. Степень кристаллизации в ситаллах доходит до 95 %. В зависимости от исходного сырья различают три вида ситаллов — фотоситаллы, термоситаллы и шлакоситаллы. Структура ситаллов является многофазной и состоит из зерен одной или нескольких кристаллических фаз, скрепленных между собой стекловидной прослойкой. Содержание кристаллической фазы колеблется от 30 до 95 %. Размер кристаллов обычно не превышает 1...2 мкм. По внешнему виду ситаллы могут быть непрозрачными и прозрачными (количество стеклофазы в них составляет до 40 %).

Шлакоситаллы получают на основе доменных шлаков и катализаторов (сульфаты, порошки железа и другие); в которые вводятся соединения фтора для усиления ситаллизации.

В отличие от обычного стекла, свойства которого определяются, в основном, его химическим составом, для свойств ситаллов решающее значение имеют их структура и фазовый состав. Причиной ценных свойств ситаллов является их исключительная мелкозернистость и почти идеальная поликристаллическая структура. Свойства ситаллов изотропны. В них совершенно отсутствует всякая пористость. Усадка материала при его переработке незначительна. Большая абразивная стойкость ситаллов делает их малочувствительными к поверхностным дефектам.

Плотность ситаллов составляет 2 400...2 950 кг/м³, прочность при изгибе $\sigma_{изг} = 70...350$ МПа (и даже 560 МПа), при растяжении — $\sigma_{в} = 112...161$ МПа, при сжатии — $\sigma_{сж} = 700...2000$ МПа, модуль упругости — 84...141 ГПа. Прочность ситалла зависит от температуры. До температуры 700...780 °С его прочность уменьшается незначительно, а при более высоких температурах — быстро падает. Жаропрочность ситаллов под нагрузкой составляет 800...1 200 °С. Максимальная температура размягчения $t_{разм} = 1\,250...1\,350$ °С. Ударная вязкость ситаллов выше, чем ударная вязкость стекла (4,6...10,5 кДж/м²), но они тоже относятся к хрупким материалам, а их твердость приближается к твердости закаленной стали (микротвер-

дость составляет 7 000...10 500 МПа). При этом они очень износостойки ($f_{тр} = 0,07...0,19$). Коэффициент линейного расширения ситаллов составляет $(7...300) \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. Из-за повышенной плотности ситаллы по теплопроводности превосходят стекла ($\lambda = 2...7$ Вт/м·К) и их термостойкость является высокой ($\Delta t = 500...900$ °С).

Стеклокристаллические материалы обладают высокой химической устойчивостью к кислотам и щелочам и не окисляются даже при высоких температурах. Эти материалы газонепроницаемы и обладают нулевым водопоглощением, они являются хорошими диэлектриками.

Применение ситаллов определяется их свойствами. Из ситаллов изготавливают подшипники, детали для двигателей внутреннего сгорания, трубы для химической промышленности, детали для химических насосов, плунжеры, оболочки вакуумных электронных приборов, детали радиоэлектроники. Ситаллы используют в качестве жаростойких покрытий для защиты металлов от действия высоких температур. Ситаллы применяют для изготовления износостойких деталей текстильных машин, абразивов для шлифования, фильер для вытягивания синтетических волокон. Из ситаллов могут быть изготовлены лопасти воздушных компрессоров и сопла реактивных двигателей. Ситаллы используются для изготовления точных калибров и оснований металлорежущих станков.

4. ИЗДЕЛИЯ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Порошковой металлургией называется область техники, включающая процессы получения порошков металлов и металлоподобных соединений, а также изготовления из них изделий без расплавления. Порошковые материалы (зачастую их называют спеченными материалами) — это консолидированные материалы, полученные из порошков, а порошки — совокупность частиц твердого вещества и (или) их агрегатов с размерами от 0,001 мкм до 1 мм.

Основными достоинствами порошковой металлургии (как метода изготовления материалов и изделий) являются следующие:

1) методы порошковой металлургии позволяют изготавливать материалы и изделия из этих материалов, которые традиционными способами получить (практически) не удастся. Пористые материалы, жаропрочные, инструментальные композиции, материалы со специальными свойствами могут быть получены только ее методами;

2) возможность использования отходов металлургического и машиностроительного производства (окалина, стружка, гальванические шламы и т. п.) в качестве исходного сырья для производства порошковых изделий;

3) возможность существенного снижения отходов за счет производства изделий с размерами, близкими к окончательным, и исключение обработки резанием.

Типовая технологическая схема получения изделий методами порошковой металлургии включает следующие операции:

- 1) производство порошков металлов и других материалов;
- 2) формование заготовки из порошка (со связкой или без нее) путем прессования или свободной насыпки;
- 3) спекание заготовки при температуре ниже температуры плавления основного компонента;
- 4) дополнительная обработка спеченного изделия (механическая обработка, пропитка, нанесение покрытий, калибрование и др.).

Приведенная технологическая схема позволяет, во-первых, изготавливать порошковые материалы и изделия с такими составами, структурами и свойствами, которые невозможно получить традиционными металлургическими методами (литьем, обработкой давлением, термообработкой) и, во-вторых, изготавливать изделия с заданными составами, структурой и свойствами, но с существенно меньшим расходом материалов и более точными размерами.

К недостаткам порошковой металлургии можно отнести:

1) ограниченность в выборе форм и размеров изготавливаемых изделий и заготовок;

2) сравнительно невысокое рафинирование по примесям, что, например, препятствует использованию методов порошковой металлургии в изготовлении монокристаллов и полупроводников.

Однако эти недостатки могут быть устранены за счет изготовления составных изделий или применения комплекса технологических процессов, включающих наряду с порошковой металлургией другие технологии.

Исходными материалами при получении изделий порошковой металлургии являются порошки. Используемые при этом порошки могут быть металлические, неметаллические, композиционные.

Из неметаллических порошков в изделиях порошковой металлургии наиболее широко представлены керамические порошки (оксиды, карбиды, нитриды, бориды и др.).

Композиционные порошки — это порошки, частицы которых состоят из химически разнородных компонентов (двух и более) и (или) фаз, разделенных четко выраженной границей.

Следует отметить, что наиболее широко применяются в изделиях порошковой металлургии порошки из различных металлов и сплавов.

4.1. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ И ИХ СВОЙСТВА

Все современные методы получения порошков можно условно разделить на механические и физико-химические.

Механические методы — это такие технологические процессы, при которых исходный материал под воздействием внешних сил измельчается без существенного изменения его химического состава.

К механическим методам относятся: дробление и размол в различных мельницах, распыление струи расплавленного металла водой или струей сжатого газа, обработка металла резанием с получением частиц, а не сливной стружки.

Физико-химические методы — это такие технологические процессы, в которых получение порошка связано с изменением химического состава исходного сырья. При этом конечный продукт (порошок), как правило, отличается от исходного материала по химическому составу.

К физико-химическим методам относятся восстановление порошков оксидов и других соединений, электролиз водных растворов и расплавленных солей, диссоциация карбониллов при нагреве и другие.

В таблице 4.1 приведены основные промышленные и опытно-промышленные методы получения порошков, используемых в технологии порошковой металлургии.

Таблица 4.1

Промышленные и опытно-промышленные методы получения порошков

Способ получения порошка	Исходное сырье	Материал порошка
1	2	3
Механические методы		
Диспергирование твердых металлов:		
Дробление	Электролитические осадки, продукты восстановления металлов	Железо, титан, медь, никель
Размол	Металлическая стружка, кусочки проволоки, чешуйки	Железо, сталь, бронза
Диспергирование расплавов:		
Распыление сжатым воздухом (RZ-метод), аргоном, азотом	Расплав распыляемого металла	Медь, бронза, железо, коррозионно-стойкие стали
Распыление водой под давлением (W-метод)	То же	Медь, бронза, железо, коррозионно-стойкие стали

Окончание табл. 4.1

1	2	3
Физико-химические методы		
Восстановление газом (водород, конвертированный природный газ, эндогаз, генераторный газ, диссоциированный аммиак), углеродом (сажа, графит, древесный уголь, кокс)	Окалина, рудный концентрат, химические соединения, чистые оксиды, их смеси	Железо, вольфрам, молибден, никель, медь, высоколегированные стали и сплавы
Металлотермическое восстановление натрием, магнием, кальцием или гидридом кальция	Оксиды, галогениды металлов, смесь железного порошка с оксидами металлов	Титан, высоколегированные стали и сплавы
Электролиз водных растворов	Растворы сульфатных солей металлов	Медь, никель, железо, вольфрам, молибден, сплавы Fe-Ni, Fe-Ni-Mo, Ni-Cu
Разложение карбониллов	Восстановленная губка соответствующего металла	Никель, железо, сплавы Fe-Ni-Mo, Fe-Ni-Co, Fe-Ni-Mn

Все большее применение в технологиях порошковой металлургии находят **композиционные порошки**. Их использование позволяет получать материалы со специальными свойствами или, учитывая особенности строения частиц и состава этих порошков, наиболее полно реализовать физико-химические реакции, протекающие при спекании этих порошков. Примерами композиционных порошков являются порошки металлов и сплавов, содержащие дисперсные включения упрочняющей фазы. Такие порошки, например, металл-оксид (Cu-SiO₂, никелевый сплав-Al₂O₃), получают распылением сплавов. Дисперсные включения оксидов в частицах порошка возникают в результате внутреннего окисления при распылении или в процессе отжига порошков при низких парциальных давлениях кислорода в газовой фазе. Композиционные порошки по структуре частицы чаще всего можно отнести к плакированным или конгломерированным.

Плакированные порошки могут иметь слоистое строение каждой частицы (рис. 4.1), состоящей из основы и нанесенных на ее поверхность (в виде оболочки) других материалов (металлов, сплавов, неметаллических материалов), или плакирующую составляющую с вкрапленными в нее частицами материала основы.

Конгломерированные порошки могут иметь различное строение, но ни одна из составляющих частиц не находится на другой в виде сплошной оболочки.

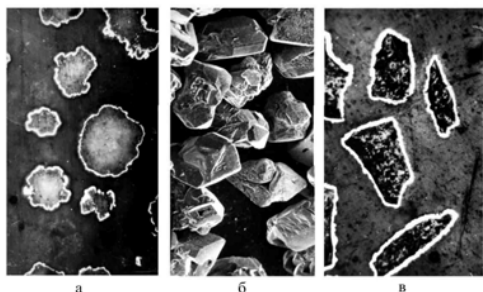


Рис. 4.1. Плакированные композиционные порошки:
а — Al_2O_3 плакированный Ni (срез); б — SiC плакированный Ni (внешний вид);
в — SiC плакированный Ni (срез).

Конгломерированные порошки (рис. 4.2) получают путем восстановительного отжига смесей, электрофорезом, спеканием и дроблением, совместной деформацией, самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС), с помощью связей.

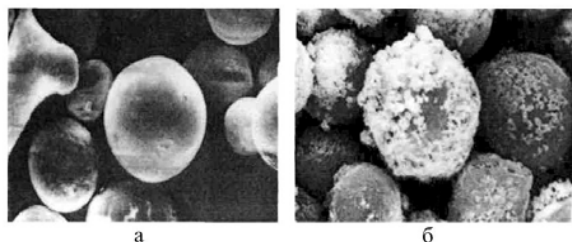


Рис. 4.2. Конгломерированный порошок: а — порошок NiCrBSi сплава;
б — порошок NiCrBSi сплава конгломерированный с дисперсными частицами Al

Недостатками восстановительного отжига являются многоступенчатость технологии и ограниченный перечень получаемых композиционных порошков. Электрофоретический метод заключается в нанесении на поверхность частиц мелкодисперсных частичек из суспензии в электростатическом поле и может осуществляться только в лабораторных условиях. Спеканием и дроблением можно получить металлические и неметаллические порошки. При этом смесь порошков спекается методами порошковой металлургии, затем дробится и разделяется на фракции. Следует отметить необходимость использования в этом случае двух технологических процессов (спекания и дробления), а также сложность управле-

ния выходом годной фракции при размоле. Метод совместной деформации предусматривает прокатку механических смесей порошков, получение порошков в шаровых мельницах или по атриторной технологии.

После прокатки механических смесей порошков полученный материал измельчается и рассеивается. Таким образом, получают металлокерамические и металлические композиции. Получение композиционных порошков в специальных аппаратах (атриторах) осуществляется пластическим деформированием смеси исходных порошков шарами, которые приводятся в движение специальными мешалками. Недостатком этого метода является продолжительность процесса. Во всех случаях при получении композиционных порошков методом пластической деформации необходимым условием является наличие достаточного количества пластичной составляющей смеси. Конгломерирование с помощью связей позволяет путем гранулирования исходных порошков получить в пределах одной частицы сочетание самых разнообразных материалов (рис. 4.3). Этот метод отличается высокой производительностью и не требует сложных технологических приемов. Наиболее часто конгломерирование с помощью связей производится в специальных смесителях или путем распылительной сушки.

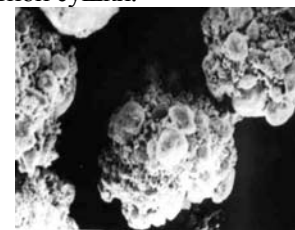


Рис. 4.3. Конгломерированный из дисперсных частиц композиционный порошок Fe_2O_3 -NiCr

4.2. ФОРМОВАНИЕ ПОРОШКОВ

Формование — это придание заготовкам из порошка формы, размеров, плотности и механической прочности, необходимых для последующего изготовления изделий из порошковых материалов. Методы формования подразделяются на две группы: с приложением давления и без его приложения.

Формование с приложением давления. К этой группе методов относятся прессование в закрытых пресс-формах, изостатическое прессование, прокатка и мундштучное прессование.

Наиболее распространенным в этой группе методов является прессование в закрытых пресс-формах, применяемое при изготовлении из-

делий простой формы (диск, конус, втулка и т. д.). Различают одностороннее прессование и двустороннее. Одностороннее прессование применяют для формования изделий, у которых отношение высоты к диаметру составляет не более 1 (рис. 4.4, а). При большем отношении применяют двустороннее прессование (рис. 4.4, б...г).

Следует отметить, что при заполнении пресс-формы порошком необходимо обеспечить равномерное распределение в ней порошка и горизонтальность его поверхности. Для получения прессовок с высокой производительностью используется прессование по ограничителю высоты. Прессование по заданному давлению обеспечивает одинаковую плотность прессовок во всем их объеме.

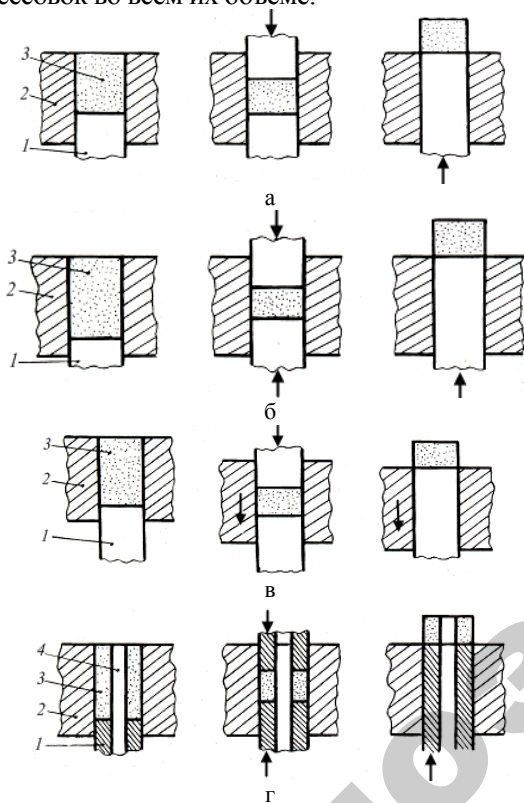


Рис. 4.4. Схемы прессования: а — одностороннего; б, в — двустороннего (с неподвижной и подвижной матрицами); г — двустороннего прессования втулок; 1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — порошок; 4 — стержень

Процесс формования данным методом включает такие основные операции, как дозирование засыпки порошка в матрицу пресс-формы, прессование, удаление брикета из пресс-формы. Следует отметить, что от правильного выбора массы порошка зависит точность заданных размеров и форм изделий.

На практике дозировку порошка осуществляют по его массе или объему, причем выбор способа определяется, в основном, типом прессового оборудования.

Прессы, используемые в порошковой металлургии, классифицируются следующим образом:

- а) по типу привода — гидравлические и механические;
- б) по направлению нагружения — вертикальные (верхнего давления и нижнего давления) или горизонтальные (как правило, гидравлические);
- в) по степени автоматизации — автоматизированные и неавтоматизированные.

В свою очередь, механические прессы бывают кривошипные, кривошипно-коленные, кулачковые и карусельные.

Выбор типа прессы определяется количеством, требуемым качеством, формой, размерами прессуемого изделия, необходимой пористостью заготовки, а также производительностью прессы и его пригодностью для выполнения данных работ.

К недостаткам метода прессования в закрытых пресс-формах относятся ограниченность числа типоразмеров получаемых изделий, а также неравномерное распределение пористости в прессовках из-за сил трения, возникающих между частицами порошка, а также между порошком и стенками пресс-формы. Преимуществами этого метода являются высокая точность размеров изделий и большая производительность процесса.

Изостатическое прессование — это метод прессования порошка в эластичной оболочке при его всестороннем сжатии. Разновидностью данного процесса является гидростатическое и газостатическое прессование, а также прессование в толстостенных эластичных оболочках (рис. 4.5), помещенных в стальную пресс-форму.

Метод *гидростатического прессования* основан на передаче давления жидкости, находящейся в сосуде высокого давления, металлическому порошку, заключенному в тонкую эластичную оболочку (рис. 4.6).

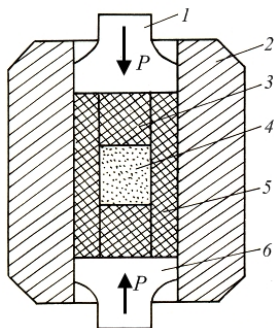


Рис. 4.5. Схема двустороннего прессования в эластичной оболочке:
1 — верхний пуансон; 2 — матрица; 3 — пробка; 4 — порошок;
5 — эластичная оболочка; 6 — нижний пуансон

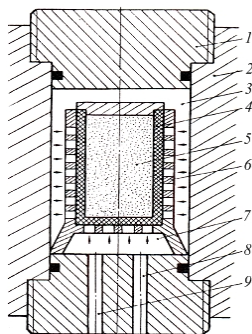


Рис. 4.6. Схема установки для гидростатического прессования:
1 — верхний затвор; 2 — камера высокого давления; 3 — жидкость под высоким давлением; 4 — эластичная оболочка; 5 — порошок; 6 — перфорированный короб;
7 — нижний затвор; 8 — ввод жидкости высокого давления; 9 — отверстие для слива жидкости

В качестве рабочей жидкости используют водные эмульсии различных масел, глицерин, чистые минеральные масла, а также воду с добавками ингибитора ржавчины. В качестве материала для оболочек применяют резину, полиуретан и металлическую фольгу. Давление прессования, как правило, не превышает 15...20 МПа.

К недостаткам прессования в гидростатах относятся трудность получения изделий с точными геометрическими размерами, относительно высокая стоимость изготовления изделий, невысокая производительность. Достоинством этого метода является возможность получения изделий больших размеров и сложной формы с равномерным распределением плотности.

Прокатка порошков — это непрерывное формирование заготовок из порошков между валками. Процесс реализуется на прокатных станах и осуществляется различными способами (рис. 4.7), отличающимися расположением плоскости осей прокатных валков (вертикальная прокатка, горизонтальная и наклонная) и подачей порошка (гравитационная, принудительная). Сущность метода заключается в подаче порошка из бункера в зазор между двумя вращающимися навстречу друг другу валками.

Основным достоинством прокатки является возможность изготовления лент и полос шириной до 450 мм и толщиной до 5 мм с относительной плотностью 0,3 и более. К недостаткам этого метода относятся возможность изготовления проката лишь простейших форм и его низкая прочность.

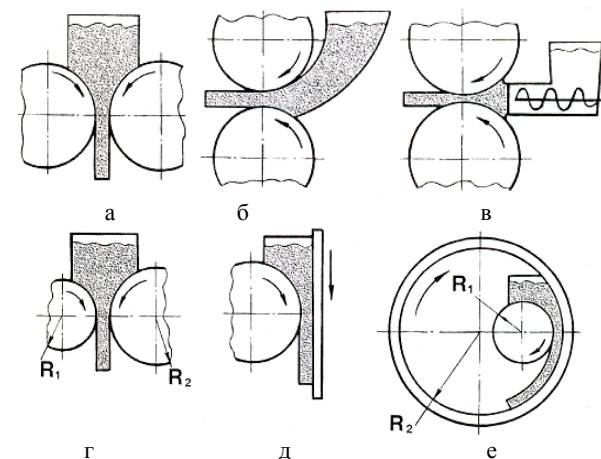


Рис. 4.7. Схемы прокатки порошка:
а — вертикальная; б — горизонтальная; в — горизонтальная с принудительной подачей порошка; г — вертикальная с валками различного диаметра;
д — вертикальная с подвижной плитой; е — с вращающимися наружным и внутренним валками

Мундштучное прессование — формирование заготовок из смеси порошка с пластификатором путем продавливания ее через отверстие в мундштуке или фильере (рис. 4.8). В качестве пластификатора применяют спиртовые растворы бакелита, крахмальный клейстер, парафин и др. Массовая доля пластификатора обычно составляет 6...10 %.

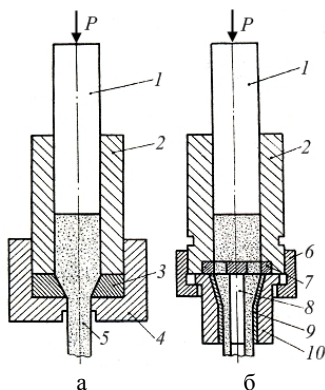


Рис. 4.8. Схема мундштучного прессования стержней (а) и труб (б): 1 — пуансон; 2 — стакан; 3 — конус; 4 — матрица; 5 — спрессованная заготовка; 6 — гайка; 7 — звездочки; 8 — игла; 9 — мундштук; 10 — обойма

Мундштучным прессованием получают трубы и стержни большой длины (до 1 м) с равномерным распределением пористости по длине изделий.

Формование без приложения давления. К этой группе методов относятся свободная засыпка порошка в форму и шликерное литье.

Свободная засыпка порошка в форму — простейший способ формования изделий без приложения давления. Для лучшего заполнения форм порошком и устранения «арочного эффекта» форму при засыпке подвергают вибрации (вручную или на вибровстряхивателе). На конечную пористость порошка в форме существенное влияние оказывают ускорение и частота вибраций.

Основным требованием к материалу формы является отсутствие взаимодействия с материалом порошка при спекании. Для порошков цветных металлов применяют стальные или графитовые формы, а для черных металлов — керамические. Теоретически габариты заготовок, сформованных свободной засыпкой порошка в формы, не ограничиваются и определяются размерами формы и рабочего пространства печей для спекания.

Шликерное литье — формование заготовок путем заливки шликера (однородной концентрированной суспензии порошка в жидкости) в пористую форму с последующей сушкой. Как правило, шликером наполняют гипсовую форму, являющуюся «негативом» требуемой конфигурации изделия (рис. 4.9). После заполнения большая

часть жидкости впитывается гипсовой формой, частицы твердой фазы подсыхают и прочно сцепляются между собой. Затем форму открывают, подсыхшую отливку извлекают и подвергают окончательной сушке и спеканию.

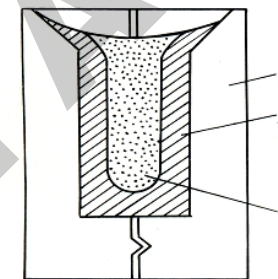


Рис. 4.9. Схема шликерного литья:

1 — разъемная гипсовая форма; 2 — сформованная заготовка; 3 — остаток шликера

Для изготовления шликера используют дисперсные порошки с размером частиц 1...2 мкм (но не более 10 мкм), так как при применении более «грубых» порошков не удастся получить устойчивую и однородную суспензию. В качестве связующей жидкости для порошков неокисляющихся металлов применяют воду, окисляющихся — спирты. Для предупреждения образования коагулянтов в растворе применяют специальные добавки типа соляной или уксусной кислот, щелочи, альгинаты аммония или натрия и др. Как правило, массовая доля твердой фазы в шликере составляет 40...70 %.

Процесс шликерного литья можно интенсифицировать, вакуумируя форму, создавая избыточное давление на шликер или нагревая его. Шликерным литьем изготавливают изделия сложной формы и больших размеров, которые трудно получить традиционными методами порошковой металлургии.

4.3. СПЕКАНИЕ

Спекание сформованных заготовок является одной из важнейших технологических операций, применяемых при изготовлении изделий методами порошковой металлургии, назначение которой состоит в придании спекаемым телам определенной структуры и соответствующих

физико-механических, гидравлических и химических свойств. Сущность процесса спекания состоит в том, что в сформованном порошковым теле имеется свободная энергия повышенного уровня (в виде энергии на поверхности раздела между фазами порошка и среды, энергии на границах зерен, избыточной энергии кристаллической решетки и др.). Уменьшить свободную энергию можно в результате переноса вещества в зоны контактов между частицами и соединения контактирующих частиц порошка друг с другом. Для протекания этого процесса необходима определенная энергия активации, обеспечиваемая соответствующим нагревом порошковой заготовки.

Под спеканием понимается термически активируемый, самопроизвольный или инициируемый внешним воздействием переход системы контактирующих твердых тел или пористой среды в термодинамически более равновесное состояние за счет уменьшения площади свободной поверхности.

Фактически спекание заключается в нагреве сформованной заготовки и ее выдержке в нагретом состоянии в течение определенного времени. Спекание проводят при температуре равной $0,7...0,9$ абсолютной температуры плавления наиболее легкоплавкого компонента смеси (твердофазное спекание). В отдельных случаях (твердые режущие сплавы) температура спекания может превышать температуру плавления наиболее легкоплавкого компонента. Этот вид спекания называется жидкофазным. В процессе спекания при повышенных температурах активизируются диффузионные процессы, что приводит к увеличению размеров контактов между частицами порошка, уменьшению объема пор, увеличению прочности прессовки. Плотность и прочность спекаемых изделий существенно зависят от атмосферы, в которой проводят спекание. При этом восстановительные среды (водород, диссоциированный аммиак) предпочтительнее нейтральных газов (аргон), так как восстановление оксидных пленок на частицах порошка ускоряет спекание. Качественно и быстро проходит спекание в вакууме. Длительность выдержки при спекании составляет от получаса до нескольких часов.

Разработанные в настоящее время методы и технологические приемы порошковой металлургии позволяют получать изделия, не уступающие литым и кованым деталям того же химического состава, и создавать новые материалы со свойствами, которые не могут быть получены обычными методами.

4.4. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Порошковые материалы по назначению можно условно разделить на антифрикционные, фрикционные, электротехнические, конструкционные, инструментальные. В некоторых случаях принадлежности порошковых материалов к той или другой группе условны, так как материал по определенным признакам может одновременно принадлежать к нескольким названным выше группам.

4.4.1. Порошковые антифрикционные материалы

Антифрикционные материалы — материалы, используемые в несущих или направляющих узлах, и обладающие повышенной износостойкостью и низким коэффициентом трения.

Антифрикционные порошковые материалы широко используются в машиностроении (в том числе в сельскохозяйственном машиностроении), приборостроении, промышленности (пищевой, фармацевтической и других ее отраслях) в узлах, работающих в самых разных условиях эксплуатации.

Антифрикционные материалы в зависимости от условий работы должны обладать следующими свойствами:

- 1) хорошей начальной прирабатываемостью, т. е. время, необходимое для снижения коэффициента трения между подшипником и валом до заданной величины, должно быть минимальным;
- 2) высокими триботехническими свойствами (коэффициент трения должен быть $\leq 0,3$ (в том числе при наличии смазки — $< 0,1$), Pv (в зависимости от режима работы) — от 20 до 40,0 МПа·м/с при скорости скольжения (v) от 2 до 200 м/с и нагрузках (P) от 45 до 0,2 МПа);
- 3) способностью выдерживать нагрузку, скорость и температуру без разрушения и изменения формы и функциональных свойств;
- 4) способностью образовывать самосмазывающиеся или легко притирающиеся продукты истирания коллоидного характера (пленку), которые могут предохранить шейку вала от износа даже при затрудненной смазке;
- 5) меньшей твердостью, чем у шейки вала, причем твердость должна снижаться как можно меньше в процессе нагрева;
- 6) высокой теплопроводностью для хорошего отвода теплоты, получаемой при трении;

- 7) достаточной выносливостью или сопротивлением усталости;
- 8) достаточной вязкостью (в случае ударной нагрузки);
- 9) хорошими технологическими свойствами;
- 10) микропористостью или микрокапиллярностью, способствующей удержанию смазки на поверхности;
- 11) хорошими антикоррозионными свойствами.

Материалами, обладающими этими свойствами, долгое время являлись литые материалы на основе меди, главным образом, оловянистые бронзы. Однако они не всегда соответствуют эксплуатационным характеристикам современных машин и механизмов.

В настоящее время существует значительное количество порошковых антифрикционных материалов, которые используются в изделиях общего машиностроения, работающих в обычных условиях, и в изделиях специального назначения, эксплуатирующихся в сложных условиях.

Широкое распространение в производстве получили пористые подшипники скольжения на основе порошков железа и меди, изготавливаемые по традиционной для порошковой металлургии технологии.

Пористые антифрикционные материалы на основе железа являются самыми распространенными. Они успешно конкурируют с литыми сплавами типа баббитов и бронз.

Пористое железо является наиболее простым типом материала, имеющего структуру феррита. При обильной смазке длительная работоспособность пористого железа обеспечивается при нагрузках 2...2,5 МПа и скорости скольжения 1...2 м/с ($Pv = 2,5...5,0$ МПа·м/с). При эксплуатации подшипников из пористого железа рабочая температура не должна превышать 70...80 °С.

Пористое железо после пропитки пор маслом применяют в качестве прядильных колец, подшипников аппаратуры, приборов и т. д.

Железографитовые материалы. Их использование в узлах трения особенно предпочтительно при затруднительной подаче регулярной смазки или недопустимости ее применения в условиях сильной запыленности среды, частых пусках и остановках механизмов, при больших нагрузках и малых скоростях скольжения (направляющие втулки, подшипники валов с возвратно-поступательным движением).

Основными компонентами для изготовления железографитовых материалов являются: железный порошок, графит и (в небольших количествах) медь, сера, фосфор. В железографитовые материалы

вводят, в основном, от 1 до 4 % графита. Графит в антифрикционных материалах выполняет двойную роль. Так, растворившийся в железе графит увеличивает прочность металлической основы, а не растворившийся — играет роль твердой смазки.

Антифрикционные свойства железографитовых материалов определяются их самосмазываемостью, хорошей прирабатываемостью, износостойкостью, прочностью. Самосмазываемость этих материалов происходит за счет масла, выступающего в процессе трения из поровых каналов, что выгодно отличает пористые антифрикционные материалы от литых. Выделение масла на поверхность трения объясняется различным объемным тепловым расширением масла и металлической основы материала, а впитывание в поровые каналы — межмолекулярными силами жидкости, действующими в случае, если ее температура не превышает критических значений. Эффект самосмазывания пористых вкладышей, пропитанных маслом, обуславливает образование на поверхностях трения граничных слоев масла, сплошность которых зависит от средней температуры процесса.

Длительность работы подшипников из железографитовых материалов определяется условиями работы и не превышает 3000...5000 часов. Такие подшипники применяют в тепловозостроении, в узлах трения сельскохозяйственных машин, для изготовления втулок угольных транспортеров и прокатных станков, деталей автомобилей, сверлильных станков и других целей.

Композиции «железо–медь–графит» способны обеспечивать работоспособность подшипников при непрерывной подаче смазки и Pv до 7,0 МПа·м/с. Для работы в условиях ограниченной смазки рекомендуют использовать композиции с повышенным содержанием графита (4...15 %) и меди (4...12 %). Материал ЖГр4Д7 (4 % С и 7 % Cu) обеспечивает работоспособность узлов трения в режиме самосмазывания при скорости скольжения 0,94 м/с и нагрузке 1,0...4,5 МПа с коэффициентом трения 0,1.

Композиции «железо–медь» и «железо–медь–графит» способны выдерживать статические нагрузки до 60...790 МПа. Дальнейшее улучшение железографитовых материалов достигается при их легировании фосфором, марганцем, цинком, оловом. Разработаны сплавы на основе железа с повышенными антифрикционными и антикоррозионными свойствами для деталей, работающих при больших нагрузках.

В узлах трения с высокими скоростями скольжения даже при небольших нагрузках могут развиваться значительные температуры, которые вместе с силами инерции способствуют удалению смазки из области трения, что делает неэффективным использование жидких или консистентных смазок. Для таких узлов, работающих в условиях сухого трения, одним из обязательных условий работоспособности узлов является создание и постоянная регенерация на их поверхности защитных разделительных пленок, исключающих контакт ювенильных металлических поверхностей и их последующее схватывание.

Для улучшения триботехнических свойств материалов, работающих в таких условиях, используют различные вещества, которые наносят на трущиеся поверхности в качестве твердой смазки. К ним относятся сульфиды, селениды, йодиды, хлориды, фториды, нитриды и оксиды металлов.

Тонкие слои твердых смазок, наносятся на поверхность трущихся деталей, но эти слои сравнительно легко смываются жидкостями или удаляются при механическом воздействии. Эффективным методом образования стабильной разделительной пленки на трущихся поверхностях является введение твердой смазки непосредственно в материал. Однако применение твердых смазок в спеченных железографитовых материалах ограничено, так как при спекании при высоких температурах возможно разложение этих смазок.

Первыми порошковыми антифрикционными материалами на основе меди, которые стали применяться в промышленности, были оловянистые бронзы. Их оптимальные антифрикционные и механические свойства обеспечиваются при 9...11% Sn. Пористость обычно составляет $P = 15...35\%$; $\sigma_b = 76...140$ МПа; $\delta \approx 5\%$; $Pv = 1,5...2,5$ МПа·м/с.

Пористые бронзы применяют для изготовления подшипников, работающих в условиях, характеризующихся малыми скоростями скольжения ($< 1,5$ м/с) и нагрузками (0,5...1,0 МПа). В условиях дополнительной смазки предельная нагрузка может составить 8 МПа при $v = 1$ м/с. С повышением скорости скольжения до 6 м/с нагрузка снижается до 1 МПа.

Широкое распространение в народном хозяйстве получили спеченные самосмазывающиеся подшипники скольжения из композиций «бронза–графит», в которых содержание графита обычно составляет 2...4%; Sn — 8...10% и Cu — 86...90% (по массе).

Перспективными триботехническими материалами для использования в подшипниках скольжения являются износостойкие спеченные хромооловянистые и хромоникелеоловянистые бронзы с твердыми смазками.

При работе в условиях особо интенсивного износа для узлов трения применяют композиции на основе карбидов и боридов.

На основе карбида вольфрама изготавливают кольца, шарики и седла клапанов, которые обладают следующими свойствами: твердость $HV 9,5...18$ ГПа, $\gamma = 11,5..15$ г/см³, $\sigma_b = 120...280$ МПа и $\alpha = (5...6) \cdot 10^{-6}$ К⁻¹.

Повышенной твердостью, прочностью, вязкостью, устойчивостью к абразивному износу, термической стабильностью и инертностью к агрессивным средам обладают материалы на основе боридов титана, циркония и гафния. В этих материалах содержится 87,5...70% боридов и 12,5...30% порошка металла этой группы.

Для подшипников скольжения, работающих при повышенных температурах, применяют композиции W–BN. Износостойкость этих композиций определяется содержанием боридов BN.

4.4.2. Фрикционные материалы

В настоящее время большинство машин и механизмов оснащено фрикционными устройствами определенного назначения. Движение машины, ее остановка и маневрирование, изменение режима эксплуатации механизма и его управление невозможны без применения фрикционных тормозных либо передаточных устройств, работа которых во многом определяет технические характеристики машин и механизмов.

В связи с жесткими условиями работы тормозных устройств современных машин фрикционные материалы должны иметь:

- 1) высокую фрикционную теплостойкость, т. е. сохранение устойчивого значения коэффициента трения и незначительного износа в широком диапазоне температур;
- 2) достаточную стойкость к истиранию. Уровень требуемой износостойкости устанавливается в зависимости от условий эксплуатации и находится в пределах от 0,01...0,02 до 0,10...0,15 мкм за рабочий цикл;
- 3) достаточную коррозионную стойкость и способность не корродировать с сопряженными деталями.

Кроме того, элементы фрикционной пары не должны схватываться (свариваться) как в процессе торможения, так и после него. Для таких материалов существенным является полное использование трущихся поверхностей, т. е. получение максимально возможной контактной поверхности. При этом видимая площадь трения должна составлять не менее 80 % номинальной, а поверхности трения должны быть гладкими (без задиrow).

Особые требования предъявляются к фрикционным материалам и в отношении физико-механических свойств, т. е. фрикционные материалы должны обладать высокой механической прочностью при рабочих температурах. В процессе эксплуатации не должно происходить скалывания и расслоения, образования глубоких трещин и выкрашивания компонентов материала, которые могут нарушить нормальную работу узла.

В настоящее время наиболее полно всем этим требованиям отвечают порошковые фрикционные материалы, которые состоят из металлических и неметаллических компонентов. Металлические компоненты придают материалу прочность, неметаллические — повышают коэффициент трения и уменьшают склонность к заеданию. Благодаря таким особенностям, эти материалы могут работать при высоких нагрузках и скоростях проскальзывания и характеризуются более высокой износостойкостью, чем другие фрикционные материалы.

Применение порошковых материалов во фрикционных узлах обеспечивает плавность их включения, стабильность коэффициента трения и повышенную долговечность.

Для работы в масле применяют разнообразные порошковые фрикционные материалы, в которых в качестве металлической связки используют медь, легированную, в основном, оловом или алюминием.

Для работы в тяжелых условиях эксплуатации (трение без смазки) применяют порошковые фрикционные материалы на основе железа. Эти материалы характеризуются более высокими фрикционными и механическими свойствами по сравнению с материалами на основе меди.

Основные области применения порошковых фрикционных изделий можно классифицировать следующим образом:

а) передаточные устройства, работающие в сухую, — слабонагруженные (тракторы, станки и другие), средненагруженные (чеканочные и штамповочные прессы, промышленный транспорт, тормоза для работы без смазки), тяжелонагруженные (самолеты);

б) сцепления, работающие со смазкой, — средненагруженные (автоматические трансмиссии, станки, управления тракторов) и тяжело-нагруженные (силовые трансмиссии в тракторах).

Следует отметить, что в гидротрансмиссиях автомобилей БелАЗ применяют порошковые фрикционные диски с накладками из материала на основе меди. Максимальное давление в этих узлах достигает 10 МПа, а максимальная скорость — 60 м/с. В колесных тормозах автогрейдеров применение порошковых фрикционных дисков позволило увеличить срок службы тормозов в 10 раз.

Новые фрикционные материалы на основе порошковых материалов применяются в тормозах и предохранительных муфтах тракторов «Беларус». Срок службы узлов при этом увеличился до 8...10 тыс. часов.

4.4.3. Электротехнические материалы

Порошковые материалы применяются в электротехнике, электромашиностроении, автоматике и телемеханике, радиотехнике, радиоэлектронике и других отраслях промышленности. На основе порошковых материалов изготавливают различные детали со специальными свойствами.

В электротехнической промышленности широко применяют различные типы разрывных и скользящих контактов. Несмотря на имеющееся в настоящее время большое количество разработанных материалов для электрических контактов различного назначения, проблема создания высоконадежных электрических контактов полностью еще не решена. Требования, предъявляемые к материалу контактов, непрерывно возрастают и изменяются. Материалы должны быть стойкими (термически, химически и механически), иметь малое электрическое сопротивление (в том числе и контактное), обладать высокими теплопроводностью и эрозионной стойкостью при воздействии электрической дуги, сопротивляемостью свариваемости при замыкании и размыкании контактов.

Технологические приемы производства электрических контактов методом порошковой металлургии разнообразны и обеспечивают возможность получения изделий не только требуемого химического состава, но и заданной структуры, определяющей оптимальное сочетание их свойств.

Разрывные электрические контакты используют для замыкания электрических цепей в высоко- и низковольтных (в том числе и слаботочных) электрокоммутирующих аппаратах и приборах. Наиболее подходящими для применения в этих контактах являются следующие материалы: вольфрам, молибден, тантал и рений. Их свойства удовлетворяют многим требованиям, предъявляемым к контактными материалам: высокая температура плавления, повышенные прочностные характеристики, требуемые значения критических сил тока и напряжения, электроэрозионная стойкость, сопротивление свариваемости, а оксиды этих материалов летучи и электропроводны.

Однако данные металлы обладают малой электропроводностью и низкой теплопроводностью, а также высоким контактным сопротивлением. Этим недостатком лишены серебро, медь, золото, платина и другие металлы платиновой группы. Они имеют высокие электропроводность и теплопроводность, коррозионную стойкость, низкое контактное сопротивление. Эти металлы используют в промышленности как контактные материалы, хотя они и являются остродефицитными и дорогостоящими. Поэтому для изготовления разрывных контактов чаще всего применяют композиционные материалы.

По составу разрывные контакты делят на следующие:

1) металлические – одно- (Ag, W, Mo, Au, Pt и другие), двух- (Ag–Ni, Ag–Mo, Ag–W, Cu–W, Cu–Mo, Au–W, Au–Mo, Fe–Cu и другие), трех- и более компонентные (Ag–Ni–Cd; Ag–Ni–Cu; W–Cu–Ni; W–Ag–Ni; Fe–Cu–Bi; Ag–Pd–Au; Ag–Pd–Ni; Ag–Ni–Cd–Te);

2) металлографитовые (Ag–C; Cu–C);

3) металлооксидные (Ag–CdO; Ag–CuO; Ag–ZnO; Ag–ZrO₂; Ag–Ta₂O₅; Ag–HfO₂; Ag–Cr₂O₃; Ag–CdO–Al₂O₃; Ag–Ni–CdO; Ag–Cu–CdO и др.);

4) металлокарбидные, металлоборидные или металлонитридные (Ag–WC; W–WC; Cu–Ni–WC; Me–TiC; TiB₂; TiN или Me–ZrB₂, ZrN и др.).

Скользящие электрические контакты представляют собой пару трения, в которой, наряду с низким контактным сопротивлением, должен обеспечиваться и низкий коэффициент трения. При этом контактная пара не может состоять из однотипных материалов, так как в этом случае в условиях эксплуатации может происходить схватывание трущихся поверхностей. Твердость материалов, составляющих контактную пару, также должна быть различной. Желательно, чтобы материал токонесу-

щего элемента был более твердым, чем материал подвижного контакта. Для улучшения антифрикционных свойств материала при сохранении его твердости и прочности в состав материала вводят твердые смазки (дисульфид молибдена, сульфид цинка, фтористый кальций, графит, селениды некоторых редких металлов и другие) или легкоплавкие металлы (например, галлий), которые становятся жидкими при работе контактной пары. Скользящие контакты применяют в виде пластин, стержней, цилиндров, проволочек и т. п. В качестве основы материала скользящего контакта чаще всего используют медь или серебро.

Наиболее распространенным методом получения таких материалов является прессование и спекание шихты из порошка меди с различными углеродсодержащими материалами. Многие металлографитовые щетки изготавливают из смесей порошков меди и природного графита. Большая часть щеток (кроме графита) содержит и другие углеродистые составляющие, которые вводят для повышения прочности, улучшения износостойкости и снижения контактного сопротивления. Такими добавками являются пек, сажа или коксовая мелочь, резина.

При изготовлении медно-графитовых скользящих контактов, которые применяются в электрощетках, необходимо создать медный каркас, придающий материалу максимальную электропроводность.

Бронзографитовые контакты содержат 2...5 % графита и 70...80 % меди (остальное — олово, железо, никель) и используются для изготовления коллекторных пластин, пантографов для двигателей электропоездов.

Серебряно-графитовые контакты содержат 2...50 % графита и используются в точных измерительных приборах в сухом состоянии либо в масляной среде при скоростях до 0,33 м/с и нагрузке 0,05...0,02 МПа.

Скользящие контакты на основе порошкового материала легированного серебра готовят из смеси порошков соответствующих компонентов. В качестве антизадирных присадок используют MoS₂, WS, MoSe, WSe, ZnS, ReS и легирующие добавки Sn, Ni, Cd, Te, Co, Pd. Дополнительно в качестве присадок вводят также оксиды (MnO, CdO). Контакты на основе серебра работают в различных климатических условиях при значениях токов от микроампер до единиц ампер.

В качестве материалов скользящих электроконтактов можно использовать также ряд материалов на основе железа и никеля. Для

токоприемников троллейбусов, трамваев, электровозов применяют сплав, содержащий 32,0...83,0 % Fe и 0,2...17,0 % C, пропитанный композицией, содержащей капролактан, гексаметилендиамин, дипиновую кислоту и формиат меди.

Магнитно-мягкие материалы широко применяют в электро- и радиотехнике, автоматике и телемеханике, радиоэлектронике, приборостроении. Изготовление магнитно-мягких изделий литьем трудоемко, а потери материала составляют до 60...80 %. При этом себестоимость магнитно-мягких спеченных деталей на 30...60 % ниже себестоимости тех же деталей, изготовленных из компактного материала путем обработки на металлорежущих станках.

В промышленности наиболее применяемыми магнитно-мягкими материалами являются чистое железо, сплавы железа с никелем (типа пермаллоя), с кремнием и алюминием (типа альсифера), с хромом или алюминием и др. Сплавы типа пермаллоя получают из механической смеси порошков, а также из порошков, полученных путем совместного осаждения карбониллов железа и никеля.

Для изготовления постоянных магнитов многих электро- и радиоприборов применяются так называемые магнитно-твердые сплавы, обладающие большими значениями коэрцитивной силы и сравнительно значительной остаточной магнитной индукцией.

Если сравнительно недавно порошковая металлургия была одним из методов получения магнитно-твердых материалов, обеспечивающим высокую технологичность, то в настоящее время возникли новые классы этих материалов, которые могут быть получены только из порошков. К таким материалам относятся магниты на основе сплавов кобальта с редкоземельными металлами, магниты на основе магнитно-твердых ферритов и на основе высокодисперсных порошков железа и его сплава с кобальтом, магниты на основе сплавов марганца с висмутом и алюминием. При этом широкое распространение получили сплавы на основе железа типа Fe-Ni-Al-Co с добавками различных элементов.

4.4.4. Порошковые конструкционные материалы

Наиболее распространенными видами порошковых изделий являются конструкционные детали, применяемые в машинах, механизмах и приборах. В зависимости от условий работы порошковые конструкционные детали подразделяют на ненагруженные, мало-

средне- и сильнонагруженные. Типовыми деталями из порошковых конструкционных материалов являются шестерни, кулачки, звездочки, зубчатые колеса, накладки, шайбы, колпачки, заглушки, храповики, накладные и специальные гайки, крышки, фланцы, седла и корпуса клапанов, статоры, диски и роторы насосов, муфты, кольца, ограничители, а также детали мерительных инструментов и другие детали сложной конфигурации, применяемые в приборостроении и различных отраслях машиностроения. Детали могут выпускаться в виде готовых изделий или заготовок, которые требуют незначительной механической обработки. Решение об изготовлении деталей машин и приборов методами порошковой металлургии принимается исходя, в основном, из экономических соображений (главную роль здесь играет стоимость пресс-форм). Экономически целесообразно изготавливать конструкционные детали методами порошковой металлургии лишь при их массовом производстве, т. е. при производстве около 50 тыс. штук на 1 пресс-форму.

Ненагруженные и малонагруженные конструкционные детали изготавливают из углеродистой стали. Их получают из смеси порошков железа и графита.

При изготовлении шестерен традиционными методами литья и механической обработки в стружку уходит до 60 % высококачественного металла. Метод порошковой металлургии позволяет, в основном, устранить этот недостаток и имеет даже некоторые дополнительные преимущества, заключающиеся в изготовлении шестерен с определенной пористостью (5...15 %) и пропитывании их маслом, которое образует с имеющимся в спеченной шестерне свободным графитом, коллоидно-графитовую смазку, удерживаемую в порах силами поверхностного натяжения. Благодаря наличию пропитанных маслом пор, уменьшается износ и снижается шум при работе шестерен.

К высокотемпературным материалам относятся материалы из тугоплавких порошков или соединений и порошковые материалы на основе этих соединений и порошков.

Тугоплавкими принято считать металлы, температура плавления которых выше, чем у железа. В качестве высокотемпературных материалов применяют материалы из порошков вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, титана. Порошковый вольфрам, тантал, ниобий, молибден применяют в атомной энергетике, радиотехнике,

порошковый вольфрам и молибден — в производстве нитей накаливания. Порошковый молибден используется для изготовления нагревательных элементов электрических печей. Порошковый титан и его сплавы, благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости, применяют при производстве деталей ракет, самолетов, для химического производства, а также в судостроении и медицине.

4.4.5. Порошковые инструментальные материалы

Инструментальные материалы — материалы, предназначенные для изготовления инструментов или их рабочих частей. Необходимыми свойствами инструментальных материалов являются высокая износостойкость и твердость. При этом желательно, чтобы эти материалы обладали достаточной вязкостью, жаропрочностью, жаростойкостью, прочностью.

К традиционно используемым инструментальным материалам относятся инструментальные стали. При этом, в связи с ужесточением условий работы (особенно режущего инструмента) сам инструмент или его рабочие части (режущие кромки) изготавливают из сверхтвердых композиционных материалов на основе алмазов, керамик, твердых сплавов и др.. Из инструментальных материалов изготавливают режущий инструмент, инструмент для обработки давлением (пресс-формы, штампы и другие), некоторые измерительные инструменты (калибры, скобы и прочие) и др. Современные инструментальные материалы позволяют с высокой точностью обрабатывать детали и осуществлять их обработку при высоких скоростях резания, а изготовленный из этих материалов инструмент обладает высокой стойкостью при ее экстремальных режимах.

Твердые сплавы. Одним из важнейших и наиболее распространенных материалов, получаемых методом порошковой металлургии, является твердый сплав. Это — гетерогенный керамико-металлический материал, характеризующийся соответствующим комплексом физико-механических свойств (особенно износостойкостью и высокой упругостью материала) и нашедший широкое применение в промышленности в качестве режущего инструмента. При получении твердых сплавов реализуются такие преимущества порошковой металлургии, как возможность получать композиционные материалы из компонентов с различной температурой плавления, возможность достижения уникального комплекса физико-механических свойств материала, а также применение безотход-

ной технологии производства и повышение коэффициента использования металла.

Твердые сплавы (ТС) — это керамико-металлические материалы, состоящие из карбидов тугоплавких металлов и пластичного связующего (металла или сплава) при содержании тугоплавкой фазы $\geq 50\%$ (объема). Современные ТС получают из высших карбидов тугоплавких металлов и металлов железной группы (железа, никеля, кобальта) спеканием в присутствии жидкой фазы.

Различают карбидовольфрамовые (WC-Co), титановольфрамовые (WC-TiC-Co), титанотанталовольфрамовые (WC-TiC-TaC-Co) и безвольфрамовые твердые сплавы.

В стандартах вольфрамовые (вольфрамокобальтовые) сплавы обозначаются буквами «ВК» с прибавлением цифры, обозначающей содержание кобальта (например, ВК6). Титановольфрамовые твердые сплавы обозначаются буквами «ТК». Марки сплавов в пределах группы также характеризуют содержание компонентов. Так, марка Т15К6 обозначает титановольфрамовый сплав типа WC-TiC-Co, содержащий 15 % TiC и 6 % Co (остальное WC).

В обозначение титанотанталовольфрамовых сплавов входят буквы «ТТК», а остальное обозначение аналогично обозначению титановольфрамовых сплавов (например, ТТ17К12). Перечень всех марок, выпускающихся в настоящее время, приведен в ГОСТ 3882-74.

К материалам, используемым для обработки резанием, предъявляют высокие требования. Комплекс основных характеристик, изучаемых у материалов данного класса, можно разделить на следующие группы (по степени важности):

- а) I группа — твердость, временное сопротивление при изгибе, теплостойкость;
- б) II группа — модуль упругости, температурный коэффициент линейного расширения;
- в) III группа — окалиностойкость (напаиваемость), температура схватывания со сталью, плотность, теплопроводность.

Следует отметить, что твердые сплавы теплостойки до температуры $+800\text{ }^\circ\text{C}$.

Некоторые свойства карбидовольфрамовых (WC-Co), титановольфрамовых (WC-TiC-Co) и титанотанталовольфрамовых (WC-TiC-TaC-Co) твердых сплавов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Некоторые свойства вольфрамсодержащих твердых сплавов

Марка	Состав % (по массе)				Твердость HRA	σ_b , МПа	E, ГПа
	WC	TiC	TaC	Co			
ВК6	94	–	–	6	92	1420	620
ВК10	90	–	–	10	90	1600	560
T5K7	88	5	–	7	90	1300–1600	550–590
T15K6	79	15	–	6	92	800–1000	420
ТТ4К10	85	4	1	10	89–90	1700–1900	450
ТТ5К9	80,5	5	5,5	9	90–91	1700–2000	560
ТТ12К8	62	12	18	8	91–92	1200–1400	630

Некоторые характеристики безвольфрамовых твердых сплавов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Характеристики безвольфрамовых твердых сплавов

Марка твердого сплава	Тип карбида	Количество карбида	Ni, % (по массе)	Mo, % (по массе)	σ_b , МПа	γ , г/см ³	Твердость HRA	$\alpha \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹
ТМ1	(Ti, Nb) C	90	5,0	5,0	800	5,8	91,5	5,9
ТМ3	(Ti, Nb) C	64	21,0	15,0	1200	5,9	89,0	–
ТН-20	TiC	79	16,0	5,0	1000	5,5	89,5	7,1
ТН-30	TiC	69	24,0	7,0	1100	5,8	88,5	8,2
ТН-40	TiC	61	80,0	9,0	1150	6,0	87,0	–
КНТ-16	Ti (C, N)	74	19,5	6,5	1100	5,8	89,0	8,9

Специальные марки твердых сплавов. В настоящее время разработаны новые твердые сплавы, которые применяют не только для обработки резанием, но и в качестве материалов, обладающих хорошей износостойкостью и высокой коррозионной стойкостью. Эти сплавы можно разделить на три группы: 1) коррозионно-стойкие твердые сплавы; 2) окалиностойкие твердые сплавы; 3) термически обрабатываемые твердые сплавы.

Основой *коррозионно-стойких твердых сплавов* является карбид хрома. Сплавы с никелевой связкой отличаются высокой износостойкостью наряду с очень хорошей химической устойчивостью и окалиностойкостью. Эти сплавы рекомендуется применять для изготовления деталей, которые одновременно с износом подвергаются действию коррозии. При этом необходимо учитывать, что твердые сплавы на основе карбида хрома являются относительно хрупкими при ударных нагрузках.

В качестве *окалиностойких* материалов используют твердые сплавы на основе карбида титана, который является единственным карбидом, имеющим в сочетании со связующим металлом (никель, кобальт, хром) высокую стойкость против окисления, жаропрочность и термостойкость.

К *термически обрабатываемым твердым сплавам* относится большая группа материалов, называемых карбидостаями, ферро-TiC и т. д., представляющих собой легированные спеченные стали с добавками сложных карбидов (преимущественно TiC).

Своеобразие таких твердых сплавов, содержащих 30...70 % (по массе) TiC, состоит в возможности применения всех видов термообработки, воздействующей на свойства стальных связок, что приводит к изменению физических и механических свойств сплава в целом.

Минералокерамические твердые сплавы. Высокая твердость и износостойкость керамических материалов на основе окиси алюминия позволяет использовать Al₂O₃ в сочетании с некоторыми другими оксидами, а также карбидами переходных металлов IV...VI групп периодической системы элементов Д. И. Менделеева для изготовления режущих керамических материалов.

Минералокерамику применяют для полустойкой и чистой непрерывной обточки и расточки деталей из серых, ковких, высокопрочных и отбеленных чугунов, закаленных и улучшенных сталей, цветных ме-

таллов и сплавов некоторых марок, а также неметаллических материалов (графит и другие) при высоких скоростях резания (до 600...800 м/мин) без применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), для волочения при производстве проволоки цветных металлов и для изготовления износостойких деталей машин, подвергающихся интенсивному безударному абразивному износу (сопла, насадки). Обеспечивая высокую производительность при обработке различных материалов резанием, минералокерамика (в силу специфичности ее свойств) не может исключить необходимость применения твердых спеченных сплавов. Минералокерамика лишь расширяет диапазон используемых режущих материалов в той области, где может служить промежуточным звеном между твердыми сплавами и алмазосодержащими, а также другими сверхтвердыми композиционными материалами. Режущая керамика — ценное дополнение к твердым спеченным сплавам с хорошими перспективами увеличения ее использования.

Исходным материалом для производства режущей минералокерамики служит технический глинозем ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) чистотой 98,5...99,5 %. Такой глинозем обжигают при температуре 1400...1600 °С, превращая его в α -модификацию (корунд). Обоженный глинозем размалывают до зернистости 1...3 мкм (например, в шаровой мельнице). Следует отметить, что измельчение зерен до их крупности менее 1 мкм нежелательно из-за увеличения хрупкости спеченного изделия.

Размолотый корунд подвергают обработке кислотами для отмычки натертого в процессе размола железа, промывают водой и высушивают.

Минералокерамический материал ЦМ-332 может быть со стеклофазой или без нее и представляет собой либо чистый оксид Al_2O_3 , либо содержит 97,0...99,5 % Al_2O_3 (остальное Cr_2O_3 или Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO).

Оксидно-металлическую керамику применяют как теплостойкий и окалиностойкий материал. Для получения режущего инструментального материала к Al_2O_3 добавляют 2...10 % Мо или Сг, благодаря чему вязкость кермета (по сравнению со спеченным чистым оксидом алюминия) улучшается, а хрупкость уменьшается.

Горячепрессованная режущая оксидно-карбидная керамика (Al_2O_3 с 20...40 % Mo_2C или сложного карбида $\text{Mo}_2\text{C-WC}$) обладает высокой прочностью и твердостью. Изделия из такого материала (марок ВЗ, ВОК-60 и ВОК-63) имеют соответственно плотность 4,20...4,60 г/см³; $\sigma_{\text{в}} = 450...700$ МПа; твердость HRA 92...94. Режущий инструмент с ме-

ханическим креплением неперетачиваемых пластин из такой минералокерамики обладает повышенными эксплуатационными свойствами. Они позволяют увеличить производительность, повысить качество обработки изделий и снизить себестоимость операции в результате увеличения скорости резания в 2...3 раза с одновременным повышением стойкости в 5 раз (в среднем) по сравнению со сплавами ВКЗМ, Т30К4 и другими износостойкими твердыми сплавами при чистовой обработке деталей.

Высокие твердость и износостойкость твердых сплавов обусловили их применение не только в качестве режущих материалов. Твердые сплавы широко применяют в приборостроении, машиностроении, горном деле и многих других областях человеческой деятельности.

Обширная область использования твердых сплавов — обработка металлов давлением (волочение, штамповка, прессование, калибровка). Твердые сплавы широко применяют в виде вставок к волокам.

Следует отметить, что одним из основных потребителей фасонных твердосплавных штампов является часовая промышленность.

В машиностроении и приборостроении детали, которые раньше изготавливали из стали, в нагружаемых местах обязательно армируют твердыми сплавами (обычно типа ВК). Армирование проводят с помощью пайки мягким или твердым припоем. Все современные высокопроизводительные токарные станки оборудуют токарными центрами, армированными твердыми сплавами, ими армируют также зажимные кулачки и люнеты. У бесцентровых шлифовальных станков армируют быстро изнашивающиеся стальные направляющие полосы. В станкостроении многочисленные детали, ранее изготовлявшиеся из стали (упоры, упорные болты, направляющие втулки, криволинейные направляющие, сверлильные кондукторы, защелки механизма подачи, щупы, прижимные ролики и т. д.), в настоящее время армируют твердыми сплавами.

Важной областью применения твердых сплавов являются сопла всех видов. Сопла для пескоструйной обработки, сопла воздуходувки, разбрызгивающие и распылительные сопла, стеклопрядильные сопла и мундштуки прессов и т. д. изготавливаются с использованием твердых сплавов.

В текстильной промышленности все более широкое применение находят направляющие кольца из твердых сплавов для нитей из натурального или искусственного шелка. Аналогичные направ-

ляющие кольца применяют при изготовлении проволочной сетки, перемотке проволоки, намотке катушек, направляющих буксировочных тросов самолетов.

В керамической промышленности и порошковой металлургии твердые сплавы используются в качестве износостойкого материала для изготовления и армирования деталей размольного и прессового оборудования (футеровка мельниц, пресс-инструмент).

Сверхтвердые материалы. К сверхтвердым относят материалы, микротвердость которых превышает 45 ГПа. К ним относятся алмазы, нитрид бора (кубический и вюрцитный), карбид бора и материалы на их основе.

Синтетические сверхтвердые поликристаллические (СТП) материалы эффективно используются в различных отраслях народного хозяйства. Первоначально СТП, в основном, использовались в инструментальном производстве, но в настоящее время их применяют и как конструкционный материал.

В зависимости от исходного сырья СТП можно разделить на три группы. К первой группе относятся материалы на основе алмаза, ко второй — на основе кубического нитрида бора, к третьей — композиционные материалы, содержащие как алмаз, так и твердые оксиды, нитриды бора, карбиды.

Алмазный инструмент используют для следующего:

1) заточки, шлифования и доводки твердосплавного инструмента (металлорежущего инструмента для обработки древесины и ее заменителей, применяемого в горнорудной промышленности и различных ее отраслях);

2) заточки и доводки хирургических инструментов;

3) обработки изделий из твердого сплава различного целевого назначения;

4) обработки часовых, приборных и ювелирных камней (синтетического рубина, сапфира, агата, яшмы, самоцветов и янтаря);

5) обработки кристаллов природных алмазов при изготовлении из них бриллиантов и инструмента;

6) доводочного шлифования стальных и чугуновых изделий;

7) изготовления твердосплавных и стальных шлифов для металлографических исследований.

Алмазный порошок и связка образуют композиционный материал, который в виде алмазосодержащего слоя является рабочей частью

инструмента. Алмазосодержащий слой определяет работоспособность и срок службы инструмента и характеризуется маркой и зернистостью алмазного порошка, маркой связки, твердостью, концентрацией алмазов, формой и размерами. Такой слой, как правило, прочно соединен с корпусом инструмента, наличие которого принципиально отличает алмазный абразивный инструмент от других типов абразивного инструмента. Материал корпуса и метод соединения с алмазосодержащим слоем выбирают в зависимости от марки связки, формы, размеров и назначения инструмента.

В настоящее время разработано множество марок сверхтвердых материалов на основе нитрида бора, различающихся составом, технологией получения и областями применения. Поликристаллические материалы на основе нитрида бора могут содержать одну кубическую кристаллическую модификацию (эльбор, кубонит, кибор). Разработаны также материалы, содержащие как сфалеритоподобную, так и вюрцитоподобную модификации нитрида бора (Гексанит-Р).

Изделия из СТП представляют собой различной формы пластины и специальные цилиндрические вставки массой от $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^4$ кг, применяющиеся для производства металлорежущего инструмента (резцов, сверл, фрез), используемого при обработке закаленных сталей и чугунов с твердостью более 40 HRC. Стойкость инструмента из СТП при обработке таких материалов более чем в 10 раз превышает стойкость инструментов из твердых сплавов, что обеспечивает повышение производительности обработки в 2...4 раза.

4.4.6. Пористые порошковые материалы

Одной из особенностей порошковых материалов является то, что технологии порошковой металлургии определяют наличие пор в структуре материала. Поры присутствуют во всех изделиях порошковой металлургии. Размеры пор, их форма и распределение в материале определяют его механические, физические и эксплуатационные свойства. Современные технологии позволяют изменять содержание пор в порошковых материалах (от 0 до 70 %) и, таким образом, получать как беспористые или низкопористые изделия, так и высокопористые материалы и изделия из них.

Работоспособность пористых порошковых материалов (ППМ) и их области применения определяются наличием взаимосвязанной системы пор. Эта поровая структура обеспечивает ППМ проницаемость для газов или жидкостей, фильтрующую способность, способность к капиллярному транспорту жидкости и ее удержанию в порах, развитую удельную поверхность и другие свойства.

Пористые порошковые материалы успешно применяются в космической технике, машино- и приборостроении, промышленности (радиоэлектронной и химической), атомной энергетике, медицине, сельском хозяйстве. По сравнению с другими проницаемыми материалами на органической (войлок, бумага, ткань, полимер) и неорганической (керамика, асбест, стекло) основах, ППМ характеризуются лучшей проницаемостью, большей прочностью, пластичностью и устойчивостью к тепловым ударам. Эти материалы коррозионностойки и жаропрочны, могут работать при температурах $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, просты и экономичны в изготовлении, допускают многократное использование.

Согласно существующей классификации ППМ и их области применения можно разделить на три группы:

1) фильтрующие (фильтры, фазоразделители, распределители газовых и жидкостных потоков, глушители звуковых и механических колебаний, огнепреградители и др.);

2) капиллярно-пористые (испарители, конденсаторы, капиллярные структуры тепловых труб, капиллярные насосы и т. п.);

3) материалы со специальными свойствами (пористые аноды, пластины аккумуляторных батарей, заменители костной ткани, катализаторы, каталитично-диффузионные мембраны и т. д.).

Фильтрующие ППМ. Наибольшее распространение получили ППМ для фильтров, которые предназначены для отделения газов и жидкостей от посторонних примесей.

Так, фильтры из ППМ используются для очистки воды, щелочных, кислотных и солевых растворов, топлива и смазочных материалов, молока, смол, основ для лаков, расплавов солей и полимеров. Кроме того, эти фильтры применяются для фильтрации сжатых и сжатых газов (азот, кислород, гелий, воздух и другие) при их производстве и практическом применении, а также отходящих газов в технологических циклах производства (химического, металлургического, цементного и других).

В некоторых случаях с помощью таких фильтров можно улавливать дорогостоящие пылевидные катализаторы, используемые в технологических процессах химического и нефтехимического

производства, что позволяет значительно их удешевлять. В зависимости от области применения, эксплуатационных и конструктивных требований фильтры изготавливают в виде дисков, пластин, цилиндров, стаканов, конусов и др.

Следует отметить, что ППМ устойчивы к резким температурным колебаниям (тепловым ударам), а своей технологичностью в изготовлении (обработка на металлорежущих станках, склеивание, сварка, пайка и т. п.) ППМ превосходят другие известные проницаемые материалы.

Фильтры из ППМ могут изготавливаться практически любых форм и размеров. Соответствующим выбором подходящего материала можно обеспечить высокую коррозионную стойкость, термическую стойкость и износостойкость фильтров.

Пористые порошковые материалы хорошо зарекомендовали себя в газораспределителях (например, при пневмотранспорте сыпучих сред). В этом случае транспортируемый продукт (цемент, мука, удобрение, пылеобразное топливо) поступает на пористую пластину, через которую снизу подается воздух. Образующаяся при этом газопылевая смесь перемещается по транспортному трубопроводу, что исключает возможность выброса дисперсных частиц в атмосферу. В этом случае материалы, изготовленные с применением ППМ, успешно заменяют ленточные и шнековые транспортеры. Опыт, накопленный при использовании таких материалов на цементных заводах, показал большие преимущества ППМ, состоящие в отсутствии движущихся и изнашиваемых деталей, низкой энергоемкости, бесшумности и надежности в эксплуатации.

Газораспределители на основе ППМ являются незаменимыми и надежными в эксплуатации и эффективно используются в разгрузочных устройствах при разгрузке содержащих дисперсные материалы вагонов, контейнеров и т. п.

Схема такого устройства показана на рисунке 4.10.

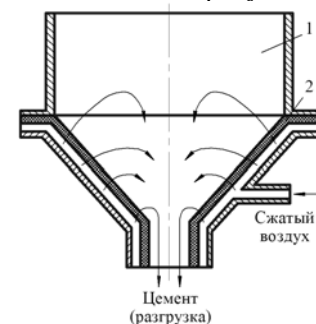


Рис. 4.10. Схема разгрузочного устройства:

1 — контейнер; 2 — газораспределительная перегородка из ППМ

Широкое применение данные материалы находят для аэрации жидких сред, обеспечивающей их перемешивание и насыщение газами. В этом случае газ подается через пористую стенку, находящуюся в непосредственном соприкосновении с жидкостью. Газовые пузырьки, выходящие из стенки, вступают в контакт с жидкостью и, благодаря развитой поверхности взаимодействия фаз газ–жидкость, интенсифицирует процесс газонасыщения. Использование для этих целей ППМ позволяет значительно сократить количество потребляемого воздуха, необходимого для насыщения воды кислородом, а также экономить электроэнергию и время, необходимое для биохимического процесса.

Аэрация используется для насыщения жидких сред кислородом воздуха, необходимого для обеспечения жизнедеятельности аэробных микроорганизмов, осуществляющих биологическую очистку хозяйственно-бытовых и промышленных стоков, микробиологический синтез биологически активных веществ, необходимых, например, при производстве ферментов, в дальнейшем используемых в биохимических процессах расщепления молекул крахмала для производства спирта. Наибольшее распространение получили пневматические методы аэрации, основанные на дроблении потока газа на мелкие пузырьки при помощи помещаемых в обрабатываемую жидкость пористых аэраторов. Пористые аэраторы различных конструкций изготавливаются из проницаемых материалов в виде перфорированных или пористых листов и труб, а также из тканей, полимерных и керамических материалов. Однако ППМ по коррозионной стойкости, длительной прочности, регенерируемости и эффективности применения превосходят другие материалы по всем показателям. Аэраторы из ППМ выпускаются преимущественно двух видов: трубчатые и дисковые. Их изготавливают из порошков титана, коррозионно-стойкой стали и бронзы. Схема дискового аэратора представлена на рисунке 4.11.

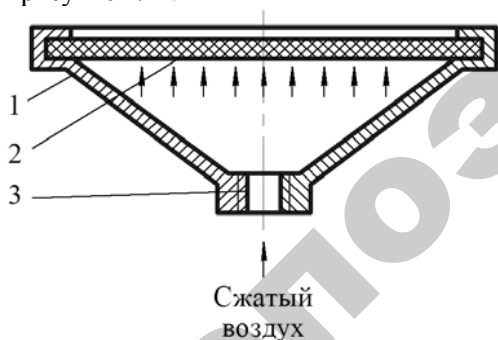


Рис. 4.11. Чертеж дискового аэратора:
1 — корпус; 2 — пористый диск; 3 — штуцер
181

Фильтрующие ППМ применяются с целью защиты объектов от теплового воздействия. Для этого через ППМ на защищаемую поверхность пропускают охладитель (газ или жидкость) и создают на ней зоны с пониженной температурой. Такое охлаждение применяют в авиационной, космической и ядерной технике (например, для защиты камер сгорания и стенок реактивных двигателей, возвращающихся на Землю космических аппаратов, стенок МГД-генераторов, электродуговых нагревателей газов и др.). Перспективными для этой цели являются псевдосплавы W–Cu, Mo–Cu. Каркас из тугоплавкого компонента позволяет сохранять требуемые прочностные свойства при высоких температурах. Медь улучшает пластичность и обрабатываемость материала и повышает его теплопроводность. Подобным способом осуществляется охлаждение свежесформованных синтетических нитей в химической промышленности (рис. 4.12).

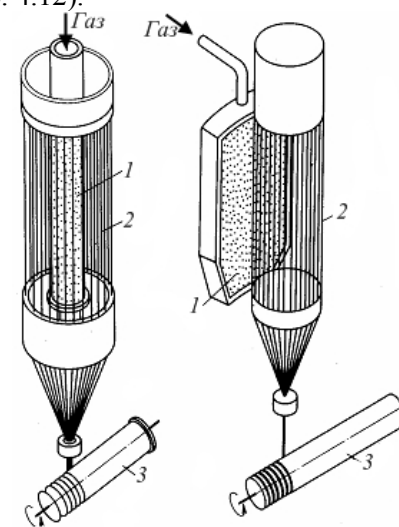


Рис. 4.12. Конструктивные варианты охлаждения с помощью ППМ в технологии получения синтетических волокон с трубчатым (а) и пластинчатым элементами (б):
1 — пористый элемент; 2 — нити; 3 — катушка

На практике используется и нагрев с помощью ППМ (например, для борьбы с обледенением самолетов). В этом случае подогретый воздух подается через пористые пластины, расположенные на передних кромках крыльев или хвостового оперения самолета.

В промышленности (химической, нефтеперерабатывающей и газовой) широко применяются процессы контактирования газа с твердыми дисперсными материалами в кипящем или псевдооживленном слое.

Кипящий слой (КС) образуется при прохождении газового потока между частицами катализатора со скоростью, достаточной для перевода их во взвешенное состояние и создания интенсивного турбулентного движения, напоминающего кипение жидкости. Равномерность выхода газа по поверхности ППМ позволяет имитировать этот процесс. Процессы в КС используются также для газификации и сжигания мелкодисперсного топлива, каталитического крекинга нефти, в ряде производств органического синтеза (получение спирта, каучука, хлористого винила и др.).

Принцип создания подъемной силы потоками жидкости или газа, выходящими из ППМ, используется в аэро- или гидростатических подшипниках, где отсутствует соприкосновение поверхностей.

На рисунке 4.13 показана схема работы подшипника на воздушной подушке. Чистота воздуха, создающего воздушную подушку, обеспечивается четырьмя фильтрами из коррозионно-стойкой стали ПРХ18Н10. Такие подшипники применяются в вычислительных устройствах и приборах.

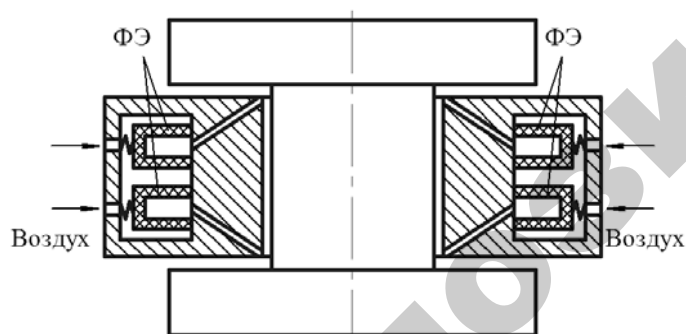


Рис. 4.13. Схема работы подшипника на воздушной подушке

Успешно применяются ППМ в смесителях для получения газожидкостных смесей (рис. 4.14). Такие смесители используются в

жидкостных ракетных двигателях для насыщения компонентов топлива газами перед впрыском их в камеру сгорания.

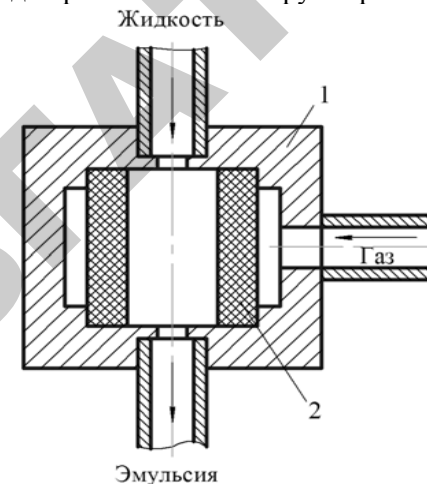


Рис. 4.14. Схема смесителя:
1 — корпус; 2 — пористый элемент

Фильтрующие ППМ, работающие в явно выраженном нестационарном режиме фильтрации применяются в огнепреградителях и активных глушителях шума.

Огнепреградители применяются для локализации распространения пламени (ацетилено-кислородного и водородно-кислородного) в автогенной технике, в газоанализаторах, детонационных установках при нанесении защитных покрытий и изготовлении электрооборудования во взрывозащитном исполнении. Огнепреградители изготавливают из порошков титана, коррозионно-стойкой стали, никеля и бронзы в виде труб, стаканов и дисков. Как правило, их устанавливают на выходе из баллонных и рамповых редукторов, а также на входе в газовые горелки. Наибольшее распространение получили глушители, изготовленные из различных порошков бронзы.

Капиллярно-пористые ППМ. Сфера применения капиллярно-пористых ППМ в современной технике расширяется в связи с интенсификацией процессов тепло- и массообмена в машинах и аппаратах.

Одним из наиболее эффективных способов охлаждения (нагрева) различных устройств является осуществление испарительно-конденсационного цикла внутри замкнутого пространства, реализуемого в тепловых трубах (рис. 4.15).

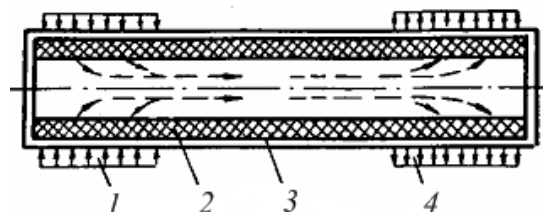


Рис. 4.15. Схема тепловой трубы:

1 — испаритель; 2 — капиллярная структура; 3 — корпус; 4 — конденсатор

Такая труба состоит из замкнутого герметичного корпуса, из которого удален неконденсирующийся газ. На внутренней поверхности корпуса расположена капиллярно-пористая структура, насыщенная жидким теплоносителем. При работе тепловой трубы подводимая теплота передается за счет теплопроводности стенки капиллярно-пористой структуре, через которую посредством теплопроводности или конвекции теплота подводится к поверхности раздела жидкость—пар, где происходит процесс испарения. Пар переходит в охлаждаемую часть трубы, где происходит его конденсация на поверхности раздела за счет переохлаждения. Образовавшийся конденсат под действием капиллярных сил возвращается по капиллярно-пористой структуре в зону испарения. Вследствие того, что в такой системе происходит передача скрытой теплоты парообразования, тепловые трубы могут передавать большие тепловые потоки, причем из-за малых градиентов давления пара температурные перепады между испарителем и конденсатором незначительны. Эффективная теплопроводность тепловой трубы на несколько порядков выше аналогичного параметра серебра, которое является одним из лучших проводников теплоты.

Наряду с высокой эффективностью теплопередачи, тепловые трубы обладают также и другими преимуществами (отсутствует необходимость в механических элементах и дополнительной энергии, высокая надежность и экономичность при относительной простоте изготовления и эксплуатации). Удачное сочетание этих

свойств позволило тепловым трубам занять в настоящее время лидирующее положение в теплотехнике.

Теплоотводы на основе тепловых труб применяются для охлаждения силовых полупроводниковых приборов таблеточного исполнения, в выпускаемых серийно агрегатах бесперебойного питания, для атомных электростанций, в устройствах питания приводов на горно-обогажительных комбинатах, в установках питания электрических цепей и др. При этом уменьшаются габаритные размеры охлаждающего устройства (на 15 %) и его масса (на 30 %). При одинаковой тепловой нагрузке охлаждаемых силовых полупроводниковых приборов упрощается конструкция преобразовательных устройств, снижаются расходы на изготовление этих устройств.

Тепловые трубы применяются в качестве элементов теплообменника типа «воздух–воздух» для охлаждения высоковольтных силовых шкафов. Теплообменник, который крепится к задней стенке силового шкафа (рис. 4.16), состоит из трубной доски с 39-ю тепловыми трубами, расположенными в шахматном порядке в 13 рядов, горячего (Б) и холодного (А) контуров, герметично закрытых крышкой кожуха.

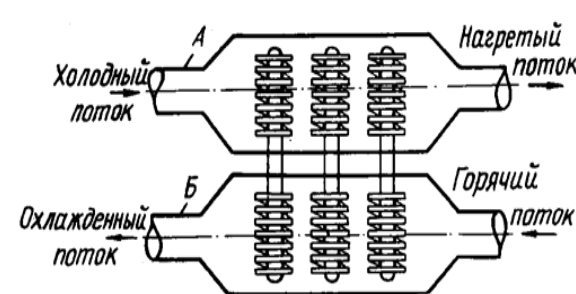


Рис. 4.16. Схема теплообменника типа «воздух – воздух»

При работе теплообменника, горячий воздух с температурой $t_{\text{вх}}^f$ из шкафа подается в контур Б. Проходя через него, воздух остывает до температуры $t_{\text{вых}}^f$ и снова попадает в шкаф. Холодный воздух из окружающей среды с температурой $t_{\text{вх}}^f$ подается в контур А, проходя через который отбирает теплоту от тепловых труб и выбрасывается в окружающую среду. При этом среднеобъемный перегрев в шкафу в зависимости от отводимой мощности уменьшается на 15...28 % по

сравнению с применяемыми пластинчатыми теплообменниками.

Перспективными конструкциями, применяемыми для охлаждения и термостабилизации модулей электронной аппаратуры, являются плоские тепловые трубы.

Экономия энергии за счет более полного использования потребляемого тепла в последние годы приобретает все большее значение. Тепловые трубы применяют для утилизации теплоты дымовых газов зерносушилок и теплогенераторов. Так, теплообменник размером $400 \times 1500 \times 2000$ мм, содержащий 200 тепловых труб длиной 2000 мм, позволяет утилизировать теплоту агента сушки рециркуляционных зерносушилок мощностью 50 кВт, предназначенных для сушки зерна, семян и других сыпучих материалов в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Теплообменник позволяет утилизировать выбрасываемый в атмосферу через выхлопные окна осадочных камер и циклонов отработанный теплоноситель, имеющий достаточно большое теплосодержание ($50 \dots 70$ °С) вследствие его высокой влажности. При этом достигается снижение расхода топлива (на 25,6 %) и влагосодержания отработанного агента сушки (в 2...3 раза).

При утилизации теплоты дымовых газов бытовых отопительных котлов с помощью теплообменника из 18 тепловых труб длиной 360 мм достигается значительная экономия топлива (более 10 %).

Тепловые трубы также применяются в электрических машинах для охлаждения роторов и статоров двигателей, генераторов, в сварочной технике для охлаждения электродов, обмоток трансформаторов, высоковольтных выключателей большой мощности, а также для охлаждения форм для литья пластмасс, при штамповке стеклянной и пластмассовой посуды, отливке алюминиевых деталей.

Одним из наиболее эффективных способов охлаждения высокотемпературных узлов и механизмов является испарительное охлаждение. Оно предполагает подачу жидкости в зону охлаждения под действием капиллярных сил. Следует отметить, что охлаждение испарением более эффективно, чем конвективное или пленочное охлаждение в равнозначных системах. Испарительное охлаждение в пористых теплообменниках является надежным средством теплового регулирования элементов топливных систем двигателей, предотвращающим перегрев топливных баков. При этом в качестве

испаряющейся жидкости может использоваться как специальная жидкость, так и криогенное топливо.

Применение ППМ в качестве испарителей в карбюраторах двигателей внутреннего сгорания способствует интенсификации испарения топлива, лучшей гомогенизации его смеси с воздухом. В результате этого достигается экономия топлива (8...14 %), сохраняются динамические качества автомобилей, снижается содержание оксида углерода в выхлопных газах (на 30...50%).

Пористые испарители выгодно отличаются от других конструкций теплообменных аппаратов тем, что не имеют подвижных частей, обладают высокой производительностью, долговечностью, имеют небольшую массу, легко восстанавливаются после длительной эксплуатации. Схема действия испарителей, используемых, например, для охлаждения потока горячего газа предстала на рисунке 4.17.

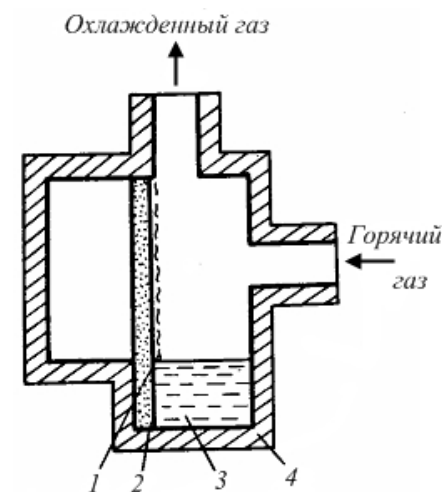


Рис. 4.17. Испаритель для охлаждения потока горячего газа:
1 — пар; 2 — пористая пластина; 3 — жидкость; 4 — корпус

Здесь нижняя часть пористых пластин, расположенных вертикально, опущена в резервуар с испаряющейся жидкостью, а их верхняя часть омывается потоком горячего газа. Уровень жидкости в резервуаре поддерживается автоматически. Принцип испарительного охлаждения используется в устройствах, предназначенных для

перевода жидкости в парообразное состояние (рис. 4.18).

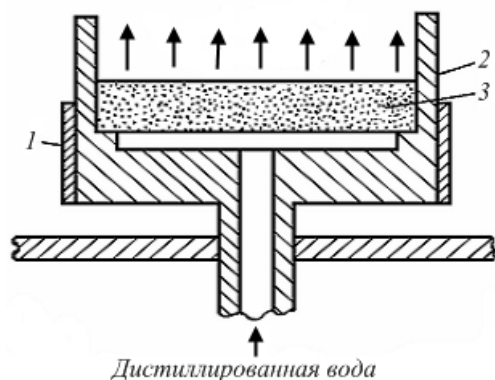


Рис. 4.18. Устройство для получения паров жидкости:
1 — электронагреватель; 2 — медный блок; 3 — ППМ

Способность ППМ впитывать в поровые каналы жидкость и длительно удерживать ее за счет действия капиллярных сил используется при изготовлении пористых самосмазывающихся подшипников, которые удерживают столько смазочного материала, что его иногда бывает достаточно для их многолетней нормальной эксплуатации. Аналогичный принцип используется в производстве ювелирных изделий из пористых материалов, пропитанных парфюмерными жидкостями и способных длительное время сохранять приятный запах. Из капиллярно-пористых материалов также изготавливают паяльники для пайки и демонтажа радиоэлектронной аппаратуры.

ППМ со специальными свойствами. Такие материалы применяются в прикладной химии в качестве пористых электродов, химических источников тока (например, пористые электроды никель-кадмиевых аккумуляторов, никелевые пористые пластины для создания щелочных батарей).

Пористые электроды используются в электрохимических генераторах (топливных элементах) при преобразовании химической энергии топлива непосредственно в электрическую энергию.

Пористые материалы применяются и в медицине. Они используются в качестве хирургического материала для замены костной ткани. Как правило, эти элементы с размерами пор 10...500 мкм изготавливают из порошков титана или коррозионно-стойкой ста-

ли. Наличие разветвленной сети поровых каналов в таких материалах способствует их проникновению в поры костной ткани и вживлению в организм человека.

Одним из наиболее перспективных способов зубного протезирования является использование зубных имплантатов, вживляемых в костную ткань челюсти. Для их фиксации и крепления необходимо применение материалов, обеспечивающих хорошую биологическую совместимость с клетками живой ткани и имеющих высокую коррозионную стойкость.

Пористые порошковые материалы из порошков алюминия, ниобия и тантала используются в качестве анодов объемнопористых электрических конденсаторов.

Существует ряд приборов и устройств, периодически работающих под водой или под воздействием водяных струй. При эксплуатации этих устройств выделяются газы, накопление которых может привести до недопустимого повышения давления в корпусе сооружения, вплоть до его деформации и разрушения. Предотвратить попадание воды в работающие приборы и обеспечить при этом отвод накопленных газов, можно используя пористые полупроницаемые мембраны, которые не пропускают воду до определенного давления и вместе с тем обеспечивают достаточную газопроницаемость. Такие материалы могут найти также применение в лампах для уличного освещения с повышенной водо- и пылезащитой, для очистки газов от влаги и т. п.

В ряде технологий, называемых чистыми (производство интегральных схем, физико-химическая поверхностная обработка металлов, химико-фармацевтическая и др.), в качестве защитной среды требуется применение водорода со строго ограниченным содержанием кислорода ($\leq 10^{-4}\%$ общего объема). Такие сверхчистые газы можно получить с использованием двухслойных мембран, состоящих из проницаемой медной основы и нанесенного на нее плотного слоя палладия. Однако в некоторых технологиях (например, при производстве интегральных схем, выращивания кристаллов и т. д.) присутствие микрочастиц меди и даже ее ионов нежелательно. В этом случае в качестве подложки используют ППМ из порошков коррозионно-стойкой стали, на которую наносят и припекают слой смеси порошков палладия и кобальта (15 % по массе). Такие двухслойные мембраны успешно используют для диффузи-

онно-каталитической очистки водорода от кислорода, при этом остаточное содержание кислорода отвечает требованиям сверхчистых технологий.

Из-за развитой поверхности и возможности получения материала с большим количеством отклонений в кристаллической структуре ППМ находят все более широкое применение при реализации каталитических процессов (например, получении азотно-водородной смеси каталитическим разложением аммиака).

Производство ППМ постоянно увеличивается в связи с совершенствований технологий получения этих материалов и расширения области их применения.

5. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Многие материалы обладают определенным комплексом свойств. Например, бетон, обладая высокой жесткостью и хрупкостью, отлично работает на сжатие и не работает на растяжение. В этой связи бетонные конструкции давно используют в качестве фундаментов и различных опор. В свою очередь, металлы обладают пластичностью, высокой прочностью и достаточно хорошо работают на растяжение. Поэтому из материала, состоящего из металла и бетона («железобетон») изготавливают конструкции, имеющие достаточную жесткость и одновременно работающие на растяжение (перекрытия, балки, пролеты мостов и др.). Такие материалы, сочетающие в себе свойства, присущие нескольким материалам, обычно называются композиционными материалами (КМ).

Период использования человеком композиционных материалов насчитывает много веков, а представление о композиционных материалах заимствовано человеком у природы. Уже на ранних стадиях развития цивилизации человек использовал для строительства кирпич из глины, в которую замешивались солома и ветки, придававшие кирпичам повышенную прочность. Некоторые древние уникальные материалы также являются композиционными материалами (например, булатная сталь).

5.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Композиционные материалы — это материалы, обладающие следующей совокупностью признаков:

- 1) состоят из двух или более компонентов, различающихся по своему химическому составу и разделенных выраженной границей;
- 2) имеют новые свойства, отличающиеся от свойств, составляющих эти материалы компонентов;
- 3) неоднородны в микромасштабе и однородны в макромасштабе;

4) свойства определяются каждым из компонентов, которые в связи с этим должны содержаться в материале в достаточно большом количестве (больше некоторого критического значения).

Компонент, непрерывный во всем объеме КМ, называется матрицей, а прерывистый, разьединенный в объеме композиции элемент (элементы) называется армирующим элементом (наполнителем).

Композиционные материалы классифицируют по следующим основным признакам: типу матрицы, виду армирующего элемента, особенностям макростроения и методам получения.

Матрица придает изделию из КМ заданную форму и монолитность, обеспечивая передачу и перераспределение нагрузки по объему материала, защищает армирующие элементы от внешних воздействий. Тип матрицы определяет технологические параметры процесса получения композита и его эксплуатационные характеристики (плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление воздействию агрессивных сред и усталостному разрушению).

По типу материала матрицы КМ могут быть:

- 1) полимерные (термопласты, реактопласты, смеси);
- 2) металлические (в том числе материалы, получаемые методами порошковой металлургии, и сплавы, состоящие из макронеоднородных фаз);
- 3) неорганические (неорганические полимеры, минералы, углерод, керамика);
- 4) комбинированные (полиматричные).

Армирующие или упрочняющие элементы распределены в матрице равномерно. Они, как правило, обладают высокой прочностью, твердостью, большим модулем упругости и по этим показателям значительно превосходят матрицу. Армирующие элементы вводят в композиционный материал с целью изменения его свойств (увеличения прочности, жесткости и пластичности; изменения плотности, электрических, теплофизических и других характеристик в различных направлениях и отдельных местах изделия). Армирующий или упрочняющий компонент часто называют «наполнителем». Во многих случаях наполнителями называют элементы, применение которых позволяет достичь не более чем 1,5...2-кратного повышения прочности матрицы. Армирующие элементы (арматура) — высокопрочные усы, волокна, ткани, кото-

рые при соответствующем содержании в композиции способствуют повышению прочности материала в 2...10 и более раз по сравнению с прочностью матрицы.

В композиционном материале могут находиться и наполнители, и армирующие элементы.

По геометрии наполнителя (армирующего компонента) КМ подразделяют на три группы:

1. С нульмерными наполнителями, размеры которых в трех измерениях имеют один и тот же порядок. К таким наполнителям относят дисперсные (преимущественно порошковые) наполнители (сажа, песок, мелкодисперсные металлы, фосфаты, стеклянные и кремнеземные микросферы и т. д.).

2. С одномерными наполнителями, один из размеров которых значительно превосходит два других. Одномерные наполнители — это волокнистые и армирующие элементы. К ним относятся природные коротковолокнистые (асбест), растительные (сизаль, джут), высокомодульные нитевидные (оксид и нитрид алюминия, оксид бериллия, карбид бора, нитрид кремния) кристаллы, а также длинномерные стеклянные, углеродные, базальтовые, борные, керамические, металлические, низко- и высокомодульные органические волокна.

3. С двумерными наполнителями, размеры которых значительно превосходят третий. К двумерным наполнителям относят ленточные, тканевые (состоящие из любых видов волокон и их сочетаний), сеточные и другие армирующие элементы.

По схеме расположения наполнителей выделяют три группы КМ (рис. 5.1):

1). с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу (рис. 5.1, а);

2). с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя в виде волокон, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях (рис. 5.1, б);

3). с трехосным (объемным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его распределении (рис. 5.1, в).

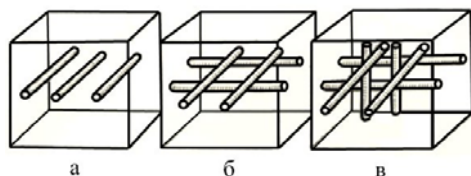


Рис. 5.1. Схема армирования композиционного материала:
а — одноосное; б — двухосное; в — трехосное

В зависимости от геометрии армирующих элементов и их взаимного расположения КМ бывают изотропными или анизотропными.

Изотропные КМ имеют одинаковые свойства во всех направлениях, эти свойства зависят от направления армирующих элементов. К макроскопически изотропным КМ относятся дисперсно-упрочненные сплавы, псевдосплавы и хаотично армированные КМ.

У анизотропных КМ свойства материала отличаются в разных направлениях и зависят от ориентации волокон.

Хаотично армированные КМ упрочняются короткими (дискретными) частицами игольчатой формы (отрезками волокон или нитевидными кристаллами — так называемыми усами), ориентированными в пространстве случайным образом. При этом КМ получаются квазиизотропными, т. е. анизотропными в микрообъемах, но изотропными в объеме всего изделия.

По методам получения КМ подразделяются на КМ, полученные жидко- и твердофазными методами, методами осаждения — напыления и комбинированными методами (здесь указаны только главные технологические приемы, обеспечивающие окончательное формирование материала).

К жидкофазным методам относятся пропитка (например, пропитка арматуры полимерами или расплавленными металлами), а также направленная кристаллизация сплавов.

К твердофазным методам относятся прессование, прокатка, экструзия, ковка, штамповка, уплотнение взрывом и другими динамическими методами, диффузионная сварка, волочение и т. п. Для КМ, полученных твердофазными методами, характерно использование матрицы в виде порошка или тонких листов.

Комбинированные КМ (рис. 5.2) бывают: полиармированные (содержащие два и более различных по составу и природе армирующих элемента), полиматричные (имеющие две или более матрицы) и т. д.

Гибридные (полиматричные и полиармированные) композиты получают одновременно с изделием. При этом соответствующий компонент (матрица или армирующий элемент) вводят в заданное место конструкции, где наиболее полно используются его положительные качества при оптимальной технологии и минимальных материальных затратах.

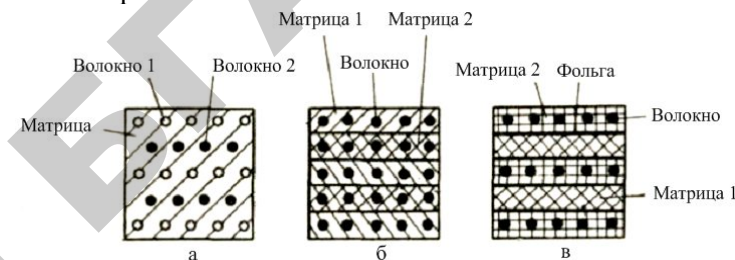


Рис. 5.2. Схема комбинированных композиционных материалов:
а — полиармированные; б — полиматричные; в — гибридные

5.2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

Такие КМ состоят из металлической матрицы (обычно из Al, Mg, Ni, Ti и их сплавов), упрочненной высокопрочными волокнами (волокнистые материалы) или тонкодисперсными тугоплавкими частицами, не растворяющимися в основном металле (дисперсно-упрочненные материалы).

Волокнистые КМ с волокнистым наполнителем (упрочнителем) по механизму армирующего действия делят на дискретные, в которых отношение длины волокна к диаметру $l/d \approx 10 \dots 10^3$, и с непрерывным волокном, в которых $l/d = \text{const}$. Дискретные волокна располагаются в матрице хаотично. Диаметр волокон составляет от долей до сотен микрометров. Чем больше отношение длины к диаметру волокна, тем выше степень упрочнения.

Часто композиционный материал представляет собой слоистую структуру, в которой каждый слой армирован большим числом параллельных непрерывных волокон. Каждый слой можно армировать также непрерывными волокнами, сотканными в ткань, которая представляет собой исходную форму, по ширине и длине соответствующую конечному материалу. При этом волокна часто сплетают в трехмерные структуры.

В качестве наполнителей композиционных материалов применяют непрерывные волокна, проволоку и дисперсные частицы. Наиболее высокими характеристиками прочности и модуля упругости обладают дискретные одномерные наполнители в виде нитевидных кристаллов (табл. 5.1).

Нитевидные кристаллы — это очень тонкие волокна с монокристаллической структурой, диаметром 1...30 мкм и отношением длины к диаметру в пределах 500...5000. Данный вид наполнителей получают путем осаждения из газовой фазы и методом транспортных химических реакций. Технология изготовления нитевидных кристаллов обеспечивает идеальное монокристаллическое строение волокна с минимальным количеством дефектов решетки, что способствует достижению высокой прочности, приближающейся к ее теоретическим значениям.

Таблица 5.1

Механические свойства высокопрочных армирующих элементов

Материал	Плотность, кг/м ³	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Модуль упругости при растяжении E , МПа	Удельная прочность, отн. ед.
Волокно:				
борное	2400...2500	5000...7000	до 450000	до 0,2
карбида кремния	3200	4000	540000	0,7
оксида алюминия	3950	2000	390000	0,4
стеклянное	2540	2800	74000	1,0
углеродное	1700...2000	2000...3500	200000...600000	до 1,1
арамидное	1400...1490	200...4000	100000...150000	до 1,6
Нитевидные кристаллы (усы):				
оксида алюминия	3950	28000	500000	4,1
карбида кремния	3200	37000	580000	6,8

Непрерывные стеклянные волокна получают, главным образом, из разогретой стекломассы. Нити, выходящие из фильера, соединяют в пряди и наматывают на бобину.

Сырьем для получения углеродных волокон служат органические волокна вискозы или полиакрилонитрила, а также смолы и пек (каменноугольный и нефтяной).

Волокна изготавливают многократной вытяжкой, главной целью которой является повышение структурной ориентации и соответствующее улучшение их механических свойств. Далее волокна подвергают пиролизу в инертной или восстановительной атмосфере и в результате многоступенчатой обработки, включающей карбонизацию и графитизацию, получают углеродные волокна, состоящие на 98 % из графита. Соблюдение необходимых параметров процесса обработки обеспечивает сохранение волокнистого строения с линейной ориентацией структурных элементов исходных продуктов.

Борные волокна изготавливают путем их осаждения из газовой фазы на подложки в виде углеродных нитей.

К классу непрерывных наполнителей металлических материалов относятся также проволоки из различных сплавов.

Прочность волокнистых КМ определяется свойствами волокон; матрица, в основном, должна перераспределять напряжения между армирующими элементами. Поэтому прочность и модуль упругости волокон должны быть значительно больше, чем прочность и модуль упругости матрицы. Жесткие армирующие волокна воспринимают напряжения, возникающие в композиции при нагружении, придают ей прочность и жесткость в направлении ориентации волокон.

Для упрочнения алюминия, магния и их сплавов применяют борные и углеродные волокна, а также волокна из тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, боридов и оксидов), имеющих высокий модуль упругости и прочность. В качестве волокон для армирования КМ часто используют проволоку из высокопрочных сталей.

Для армирования титана и его сплавов применяют молибденовую проволоку, волокна сапфира, карбида кремния и борида титана.

Повышение жаропрочности никелевых сплавов достигается армированием их вольфрамовой или молибденовой проволокой. Металлические волокна используют и в тех случаях, когда требуется обеспечить хорошую теплопроводность и высокую электропроводимость материала. Хорошими упрочнителями для высокопрочных и высокомодульных волокнистых КМ являются нитевидные кристаллы из оксида и нитрида алюминия, карбида и нитрида кремния, карбида бора и борида титана.

Композиционные материалы на металлической основе обладают высокой прочностью (σ_b, σ_{-1}) и жаропрочностью, но малой пластичностью. Однако волокна в КМ уменьшают скорость распространения трещин, зарождающихся в матрице, и практически полностью исключают внезапное хрупкое разрушение материала. Отличительной особенностью одноосных волокнистых КМ является анизотропия их механических свойств вдоль и поперек волокон, а также малая чувствительность к концентраторам напряжения.

Анизотропия свойств волокнистых КМ учитывается при конструировании деталей для оптимизации их свойств путем согласования полей сопротивления и напряжения.

Армирование алюминиевых, магниевых и титановых сплавов непрерывными тугоплавкими волокнами бора, карбида кремния, диборида титана и оксида алюминия значительно повышает жаропрочность этих сплавов. Особенностью КМ является малая скорость их разупрочнения при повышении температуры.

Основным недостатком КМ с одно- и двумерным армированием является низкое сопротивление межслойному сдвигу и поперечно-му обрыву. Этому недостатка лишены материалы с объемным армированием.

В дисперсно-упрочненных КМ (в отличие от волокнистых) основным элементом, несущим нагрузку, является матрица, а дисперсные частицы тормозят в ней движение дислокаций. Высокая прочность достигается при размере частиц 10...500 нм, среднем расстоянии между ними 100...500 нм и их равномерном распределении в матрице. Прочность и жаропрочность (в зависимости от объемного содержания упрочняющих фаз) не подчиняются закону аддитивности. Оптимальное содержание второй фазы для различных металлов неодинаково, но обычно оно не превышает 5...10 % объема.

Использование в качестве упрочняющих фаз стабильных тугоплавких соединений (оксиды тория, гафния, иттрия, сложные соединения оксидов и редкоземельных металлов), которые не растворяются в матричном металле, позволяет сохранить высокую прочность материала до температуры 0,9...0,95 $t_{пл}$. В связи с этим такие материалы обычно применяют в качестве жаропрочных. Дисперсно-упрочненные КМ могут быть получены на основе большинства применяемых в технике металлов и сплавов.

Наиболее широко используют сплавы на основе алюминия — САП (спеченный алюминиевый порошок). Он состоит из алюминия

и дисперсных чешуек Al_2O_3 . Частицы Al_2O_3 эффективно тормозят движение дислокаций и, тем самым, повышают прочность сплава. Содержание Al_2O_3 в САП колеблется от 6...9 % (САП-1) до 13...18 % (САП-3). С увеличением содержания Al_2O_3 значение σ_b повышается от 300 МПа (для САП-1) до 400 МПа (для САП-3), а относительное удлинение снижается с 8 до 3 % соответственно. Плотность этих материалов равна плотности алюминия, они не уступают ему по коррозионной стойкости и даже могут заменять титан и коррозионно-стойкие стали при работе в интервале температур 250...500 °С. По длительной прочности САП превосходят деформируемые алюминиевые сплавы.

При этом большие перспективы имеют и никелевые дисперсно-упрочненные материалы. Наиболее высокую жаропрочность имеют сплавы на основе никеля с 2...3 % (по объему) двуоксида тория или гафния. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы (как и волокнистые) стойки к разупрочнению с повышением температуры и длительности выдержки при данной температуре.

Следует отметить, что области применения КМ с металлической матрицей не ограничены. Эти материалы применяются:

- 1) в авиации — для изготовления высоконагруженных деталей самолетов (обшивка, лонжероны, нервюры, панели и т. д.) и их двигателей (лопатки компрессора и турбины и т. д.);
- 2) в космической технике (для изготовления узлов силовых конструкций аппаратов, подвергающихся нагреву, для элементов жесткости, панелей);
- 3) в автомобилестроении (для облегчения веса кузовов, рессор, рам, панелей кузовов, бамперов и т. д.);
- 4) в горной промышленности (буровой инструмент, детали комбайнов и т. д.);
- 5) в гражданском строительстве (пролеты мостов, элементы сборных конструкций высотных сооружений и т. д.) и других областях техники.

5.3. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Класс полимерных КМ включает вещества, состоящие из полимерной матрицы (связующего) и упрочняющего наполнителя в виде волокон, дисперсных частиц или порошков. Армированные стеклянными воло-

нами полиэфирные материалы впервые были использованы в конструкции самолета (1942 г.), после чего было начато промышленное производство стеклопластиков. Современные высокопрочные композиты на полимерной матрице, армированные волокнами и «усами», стали широко использоваться в начале 70-х годов XX века.

Связующими веществами полимерных КМ являются природные (смолы различного состава, каучук) и искусственные (получаемые переработкой природных материалов или синтезированные) вещества.

Композиционные материалы с полимерной матрицей по фазовому состоянию компонентов подразделяются на материалы, содержащие компоненты в твердом, жидком и газообразном состояниях.

К полимерным композитам с порошковым наполнителем относятся:

1) конструкционные общетехнические пластины на основе термoplastов, наполненные коксом, каолином и другими частицами (они предназначаются для слабо- и средненагруженных изделий машиностроения — зубчатых колес, подшипников, уплотнителей, корпусных деталей);

2) металлонаполненные пластики, обладающие по сравнению с исходными полимерами большими прочностью, теплостойкостью и теплопроводностью;

3) фено-, amino- и эпоксипласты и т. п. композиты на основе фенолформальдегидных, карбамидных, эпоксидных и других смол с органическими и минеральными наполнителями типа древесной, кварцевой или слюдяной муки, асбеста, талька, кокса (в зависимости от типа наполнителя материалы обладают повышенными прочностью, теплостойкостью, химической стойкостью, диэлектрическими свойствами).

В полимерных композиционных материалах широко применяют полимерные смолы.

Эпоксидные смолы в неотвержденном состоянии представляют собой полимеры линейного строения. Различаются смолы холодного и горячего отверждения. Эпоксидные смолы обладают универсальным комплексом свойств: технологичность при изготовлении полуфабрикатов и изделий; малая усадка при затвердевании. Важным технологическим свойством этих смол является их возможность длительное время находиться в неотвержденном состоянии, что необходимо для изготовления полуфабрикатов в виде предварительно пропитанных и частично отвержденных тканей, лент, жгутов, из которых формируются изделия.

Примером полимерных композитов, содержащих жидкофазные компоненты, являются ингибированные пластмассы, в состав которых входят ингибиторы коррозии. Ингибиторы, выделяясь из пластмасс через поры, предохраняют от коррозии сопряженные металлические детали.

К полимерным композитам с газовыми компонентами относятся различные виды газонаполненных пластмасс, отличающихся очень малой удельной массой. Это — пенопласты, поропласты и сотопласты.

В настоящее время интенсивно развивается технология микрокапсулирования — создание КМ в виде микрокапсул (твердых оболочек, содержащих вещество в газовой, жидкой или твердой фазе). Микрокапсулы, содержащие воздух, используются для создания полимерных композитов, которые называются пластиками с полым наполнителем.

Наиболее распространенными полимерными композитами с волокнистым наполнителем являются стекло-, асбо-, угле- и боропластики, полимерная матрица которых упрочнена волокнами стекла, асбеста, углерода и бора соответственно. Эти материалы обладают высокой удельной прочностью и используются в транспортном машиностроении, судостроении и авиастроении. Повышенную прочность, термическую и химическую стойкость, электро- и теплопроводность имеют углеродопласты (карбопласты, углепластики), упрочненные углеродными волокнами.

Типичными представителями полимерных слоистых композитов являются текстолиты и гетинаксы (КМ на основе ткани и бумаги соответственно, пропитанные термореактивными смолами).

Широко распространенными КМ являются стеклопластики на основе стеклотканей, а также изделия из композитов на основе каучуков и резин (приводные ремни, транспортные ленты, шины автомобилей и др.).

Однонаправленные стеклопластики обладают высоким комплексом свойств в направлении укладки волокон. Прочность стеклопластиков по абсолютной величине превышает прочность типовых термоупрочняемых сплавов и конструкционных легированных сталей. В поперечном к волокну направлении свойства стеклопластиков значительно (в 30...40 раз) хуже и определяются только свойствами связующего вещества.

Перекрестно армированные стеклопластики с равным расположением слоев различной ориентировки изотропны по своим свой-

ствам. Однако прочность и модуль упругости у таких стеклопластиков в 2...3 раза ниже, чем у однонаправленных стеклопластиков.

Хорошим сочетанием свойств обладает стеклопластик, в котором в качестве армирующего элемента применяют стеклоткани.

В химическом машиностроении из полиэфирных и эпоксидных стеклопластиков изготавливают трубопроводы, воздухопроводы и емкости. При этом освоено промышленное производство следующих изделий: трубы диаметром 50...1050 мм и толщиной стенки 4...20 мм; воздухопроводы диаметром 50...1500 мм с толщиной стенки 3...6,5 мм; емкости объемом до 500 м³ диаметром до 3500 мм и длиной до 1100 мм. Сроки службы конструкций из стеклопластиков, благодаря высокой стойкости во многих жидких и газовых средах химических производств, в ряде случаев превышают сроки службы аналогичных узлов из металлов в 5...10 раз.

В приборостроении стеклопластики применяются для изготовления каркасов, панелей, печатных плат; корпусных деталей.

В транспортном машиностроении стеклопластики применяют для обшивки вагонов, контейнеров, кабин и элементов силового набора (стрингеры, шпангоуты).

В судостроении стеклопластики применяют для изготовления корпусов лодок, катеров, траулеров, резервуаров для перевозки сжиженных газов и жидких продуктов. Основным методом изготовления изделий (ввиду малых объемов производства одинаковых деталей) является контактное формование.

Карбоволокониты (углепласты) представляют собой КМ, состоящие из связующей матрицы и упрочнителей в виде углеродных волокон (карбоволокон). Углеродные волокна изготавливают из вискозного или полиакрилонитрильного волокна путем их термической обработки при температуре 1500...3000 °С в инертной среде. При этом происходят процесс карбонизации и образование кристаллической фракции углерода. Высокая энергия связи С-С углеродных волокон позволяет им сохранять прочность при температурах до 2200 °С (в нейтральной и восстановительной средах) и при низких температурах. От окисления поверхности волокна предохраняют защитными покрытиями (пиролитическими). В отличие от стеклянных волокон карбоволокна плохо смачиваются связующим (низкая поверхностная энергия) и поэтому их подвергают травлению. При этом увеличивается степень активирования углеродных волокон по

содержанию карбоксильной группы на их поверхности, в результате чего межслойная прочность при сдвиге углепластиков увеличивается в 1,6...2,5 раза. Во многих изделиях применяются пространственно армированные структуры.

Следует отметить, что связующими матрицами служат синтетические полимеры (полимерные карбоволокониты); синтетические полимеры, подвергнутые пиролизу (коксованные карбоволокониты); пиролитический углерод (пироуглеродные карбоволокониты). При этом полимерные карбоволокониты наиболее просты в изготовлении.

Эпоксифенольные карбоволокониты могут длительно работать при температуре до 200 °С, а карбоволокониты на основе полиамидного связующего можно применять при температуре до 300 °С.

Карбоволокониты отличаются высоким сопротивлением усталости (статическим и динамическим) и сохраняют это свойство при нормальной и очень низкой температурах (высокая теплопроводность волокна предотвращает саморазогрев материала за счет внутреннего трения). При этом теплопроводность углепластиков в 1,5...2 раза выше, чем теплопроводность стеклопластиков и они водо- и химически стойкие.

Наряду с карбонитами, разработаны карбостекловолокониты, которые, как и угольные, содержат стеклянные волокна, что удешевляет материал.

Коксованные карбоволокониты получают из обычных полимерных карбоволоконитов, подвергнутых пиролизу в инертной или восстановительной атмосфере. При температуре 800...1500 °С образуются карбонизированные карбоволокониты, при 2500...3000 °С — графитированные.

Для получения пироуглеродных карбоволоконитов упрочнитель выкладывается по форме изделия и помещается в печь, через которую пропускается газообразный углеводород (метан). При определенном режиме (температура 1100 °С и остаточное давление 2660 Па) метан разлагается и образующийся пиролитический углерод осаждается на волокнах упрочнителя, связывая их. Образующийся при пиролизе связующего вещества кокс имеет высокую прочность сцепления с углеродным волокном. В связи с этим композиционный материал обладает высокими механическими и абляционными свойствами, стойкостью к термическому удару.

Карбоволоконит с углеродной матрицей типа КУП-ВМ по значениям прочности и ударной вязкости в 5...10 раз превосходит

специальные графиты. При нагреве в инертной атмосфере и вакууме этот материал сохраняет прочность до температуры 2200 °С, но на воздухе окисляется при температуре 450 °С и требует защитного покрытия. Коэффициент трения одного карбоволокнита с углеродной матрицей по другому карбоволокниту высок (0,35...0,45), а износ мал (0,7...1 мкм на торможение).

Полимерные карбоволокниты используют в судо- и автомобилестроении (кузова гоночных машин, шасси, гребные винты). Из этих материалов изготавливают подшипники, панели отопления, спортивный инвентарь (весла, ракетки, рамы велосипедов), части ЭВМ. Высокомодульные карбоволокниты применяют для изготовления деталей авиационной и космической техники (сопла реактивных двигателей, лопасти вертолетов и прочие), аппаратуры для химической промышленности, рентгеновского оборудования и т. д.

Карбоволокниты с углеродной матрицей заменяют различные типы графитов. Эти материалы применяются для тепловой защиты, изготовления дисков авиационных тормозов, химически стойкой аппаратуры.

Бороволокниты представляют собой КМ из полимерного связующего и упрочнителя — борных волокон. Бороволокниты отличаются большими значениями прочности (при сжатии, сдвиге и срезе), низкой ползучестью, высокими твердостью и модулем упругости, теплопроводностью и электропроводностью. Ячеистая микроструктура борных волокон обеспечивает их высокую прочность при сдвиге на границе раздела связующего вещества с матрицей.

Кроме непрерывного борного волокна, применяют комплексные боростеклониты, в которых несколько параллельных борных волокон оплетаются стеклонитью, придающей им формоустойчивость. Применение боростеклонитей облегчает технологический процесс изготовления материала.

В качестве матриц для получения бороволокнитов используют модифицированные эпоксидные и полиамидные связующие вещества. Бороволокниты (в зависимости от матрицы) работают при температуре 100...300 °С.

Они обладают высоким сопротивлением усталости, стойки к воздействию радиации, воды, органических растворителей и горюче-смазочных материалов.

Поскольку борные волокна являются полупроводниками, то бороволокниты обладают повышенной теплопроводностью и электропроводностью. Прочность при сжатии у бороволокнитов в 2...2,5 раза больше, чем у карбоволокнитов.

Изделия из бороволокнитов применяют в авиационной и космической технике (профили, панели, роторы и лопасти компрессоров, лопасти винтов и трансмиссионные валы вертолетов и т. д.).

Органоволокниты представляют собой КМ, состоящие из полимерного связующего и упрочнителей (наполнителей) в виде синтетических волокон. Такие материалы обладают малой массой, сравнительно высокими удельной прочностью и жесткостью, стабильны при действии знакопеременных нагрузок и резкой смене температуры. Для синтетических волокон потери прочности при текстильной переработке небольшие; они малочувствительны к повреждениям.

В органоволокнитах значения модуля упругости и температурных коэффициентов линейного расширения упрочнителя и связующего близки. Происходит диффузия компонентов связующего в волокно и химическое взаимодействие между ними. Материалы с такой структурой бездефектны, а их пористость не превышает 1...3 % (в других материалах — 10...20 %). Этим объясняется стабильность механических свойств органоволокнитов при резком перепаде температур, действии ударных и циклических нагрузок. Ударная вязкость этих материалов высокая и составляет 400...700 кДж/м², а недостатком является сравнительно низкая прочность при сжатии и высокая ползучесть (особенно для эластичных волокон).

Органоволокниты сохраняют устойчивость в агрессивных средах и во влажном тропическом климате. Диэлектрические свойства этих материалов высоки, а теплопроводность низка. Большинство органоволокнитов может длительно работать при температуре 100...150 °С, а на основе полиамидного связующего и полиоксадиазольных волокон — при 200...300 °С.

В комбинированных материалах, наряду с синтетическими волокнами, применяют и минеральные волокна (стеклянные, карбоволокна и бороволокна). Такие материалы обладают большей прочностью и жесткостью.

Органоволокниты применяются в качестве изоляционного и конструкционного материалов в электро- и радиопромышленно-

сти, авиационной технике, автомобилестроении. Из этих материалов изготавливают трубы, емкости для реактивов, покрытия корпусов судов и т. д.

Следует отметить, что все большее применение находят полимерные КМ, содержащие компоненты в жидкой фазе. Это материалы, в полимерной матрице которых имеются поры, заполненные жидкостью.

Антимикробные полимерные материалы содержат препараты, обладающие свойством подавлять жизнедеятельность микроорганизмов (бактерицидные) или ограничивать их развитие (бактериостатические).

В качестве антимикробных препаратов применяют:

- 1) химические консерванты (сорбиновую, бензойную, нитробензойную кислоты, их соли и эфиры);
- 2) антибиотики (низин, тетрациклин и их производные);
- 3) ионы металлов (серебра, меди, цинка, ртути) и др.

Ионообменные смолы или синтетические органические иониты — это нерастворимые в воде и органических растворителях высокомолекулярные полиэлектролиты (полимеры, в состав которых входят группы, распадающиеся на ионы в растворе), при контактировании которых с растворами электролитов имеет место обмен подвижных ионов смолы на ионы электролита. Важнейшей областью применения ионообменных смол является подготовка воды, в частности, ее деминерализация. Умягчение воды путем замены ионов кальция и магния на натрий является наиболее распространенным примером промышленного использования ионообменных смол. В гидрometаллургии с их помощью извлекают металлы из разбавленных растворов; в промышленности (пищевой, фармакологической и химической) — разделяют компоненты смесей, очищают препараты, проводят анализы веществ методом ионообменной хроматографии и т. д. Номенклатура ионообменных смол включает сотни марок материалов общего и специального назначения, выпускаемых под различными торговыми названиями.

Противокоррозионные пластики — это КМ, содержащие ингибиторы коррозии. В зависимости от назначения и условий эксплуатации используют материалы с матрицами, снабженными системой сообщающихся или закрытых пор. В первом случае выделение ингибиторов коррозии из матрицы на поверхность сопряженной металли-

ческой детали происходит самопроизвольно, во втором — открытие пор, в которых заключен ингибитор, имеет место при внешних механических воздействиях (давлении, изнашивании и т. п.).

Противокоррозионные пластики выполняют в машинах основную функцию конструкционного материала и обладают дополнительными функциональными свойствами, предохраняя от коррозии сопряженные металлические детали. Упаковка деталей в ингибированную полиэтиленовую пленку обеспечивает их защиту от коррозии в течение 3...7 лет.

5.4. КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Перспективным классом КМ являются композиты с матрицей на основе неорганических полимеров (асбест, графит) и керамики, широко распространенных в природе, или которые можно получить с применением достаточно простых технологий. Неорганические материалы позволяют использовать в качестве наполнителей высокопрочные волокна, сетки, дисперсии, благодаря чему удается получать композиционные материалы с комплексом заданных характеристик. Ужесточение условий эксплуатации узлов и деталей современной техники, связанное с резким повышением температур, нагрузок и скоростей при эксплуатации автомобилей, двигателей самолетов и ракет, криогенной техники и электроники потребовало создание принципиально новых технических решений.

По структурным признакам керамические КМ можно разделить на пять основных групп:

- 1) дисперсные;
- 2) армированные неориентированными поликристаллическими волокнами, нитевидными кристаллами и проволоками;
- 3) армированные ориентированными волокнами, в том числе ориентированными эвтектиками;
- 4) слоистые;
- 5) гранулослоистые.

Дисперсные керамические КМ состоят из матрицы и частиц наполнителя, равномерно распределенных по объему материала.

В армированных керамических КМ волокнообразный наполни-

тель может быть расположен произвольно или ориентированно. В качестве армирующего наполнителя в таких материалах применяют волокна металлов и металлических сплавов, проволоку, сетки различного плетения на основе углеродистых, нержавеющих и мартенситостареющих сталей. Высокопрочные материалы армируют проволокой из титана, бериллия, вольфрама, молибдена. Широко используют в качестве наполнителей керамических КМ волокна бора, карбида кремния, борсика (BSi), углеродные, стеклянные.

Следует отметить, что технологии производства керамических волокон, которые применяются для изготовления теплозащитных и жаропрочных керамических КМ, интенсивно развиваются. Сырьем для керамических волокон служат Al_2O_3 , TiC, $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$, SiO_2 и другие соединения. Все большее применение получают наполнители керамических КМ в виде нитевидных кристаллов на основе Al_2O_3 , SiC, AlN, TiO_2 и других соединений с направленной кристаллизацией.

Керамические КМ получают преимущественно методами порошковой металлургии. По структуре эти КМ отличаются большим разнообразием. Например, слоистые керамические КМ содержат компоненты, расположенные в виде слоев различного состава. Наполнителем таких материалов часто служит металлическая фольга. Другие типы керамических КМ получают послойным распределением металлического компонента (порошка, нитей, фольги) и порошковой керамики. Разработана группа гранулослоистых керамических КМ, состоящих из компонентов в виде гранул.

В зависимости от технологии получения различают спеченные и прессованные керамические КМ.

При их получении широко используются порошки. Для производства дисперсной шихты при получении керамических КМ обычно применяют механическое перемешивание компонентов в шаровых, вибрационных или планетарных мельницах.

В технологии получения керамических КМ в качестве исходных материалов часто применяют композиционные порошки. Это могут быть композиционные порошки системы «металл–керамика». В них каждая частица состоит из керамики, в объеме которой содержится включения металла или каждая ее частица плакирована металлом. Могут использоваться и композиционные порошки системы «керамика–керамика», полученные, например методом СВС.

Керамические КМ получают формированием заготовок с последующим их спеканием. Формование заготовок осуществляют уплотнением порошковых смесей (сухих или содержащих пластификаторы). Для формования простых по форме и небольших по размерам деталей используют традиционные методы прессования: вибрационное, в пресс-формах, гидростатическое, в упругих оболочках и т. д. Длинномерные изделия получают методом экструзии. Для повышения технологичности прессования в смеси вводят пластификаторы в дозах, достаточных для покрытия каждой частицы тонкой пленкой. Смеси компонентов керамических КМ, содержащие пластификатор, называют шликером. Крупногабаритные изделия формируют литьем водных шликеров в гипсовые формы. Заготовки изделий сложной конфигурации с повышенной точностью геометрических размеров получают из шликеров на термопластичной связке (полимеры, парафины, воск).

Технология формирования изделий из керамических КМ, армированных металлическими нитями, усами, проволокой, сетками, более сложна. Это связано с незначительной (по сравнению с арматурой) насыпной массой порошковой смеси и возможностью повреждения армирующих компонентов при перемешивании смеси.

Изделия из керамических КМ с нитевидными кристаллами формируют суспензионным методом. При этом суспензию порошкообразных компонентов керамики в технологической жидкости небольшими порциями заливают в форму с пористым или сетчатым дном. После отсасывания жидкости образуется слой осадка, в котором армирующие агрегаты из нитевидных кристаллов ориентированы параллельно плоскости днища формы.

Выбор метода изготовления изделий из керамических КМ, содержащих волокно, нити, усы, индивидуален для каждого конкретного состава материала.

Спекание заготовок керамических КМ осуществляют в печах с регулируемой газовой средой при необходимых температурно-временных режимах. Перспективным технологическим направлением спекания изделий из керамических КМ является воздействие электрического поля. Такой метод позволяет одновременно осуществлять уплотнение спекаемой массы и формирование требуемой структуры за малые промежутки времени.

Типичным представителем дисперсных керамических КМ являются керамико-металлические материалы (керметы). Они пред-

ставляют собой гетерогенные композиции одной или нескольких керамических фаз с металлами.

Определяющими требованиями к компонентам керметов являются химическая стабильность, термическая совместимость, возможность образования адгезионной связи на границе раздела фаз.

Компоненты керметов не должны вступать в химическое взаимодействие или растворяться друг в друге (в противном случае формируется однофазный или керамический материал, состоящий из смеси различных соединений).

В качестве сырья для производства керметов используют оксиды металлов, карбиды, нитриды. Металлы, используемые как компоненты керметов, должны иметь сродство к кислороду меньше, чем у оксида, не образовывать карбиды и устойчивые нитриды, ограниченно растворять углерод и азот.

Керметы классифицируют по составу (оксидные, нитридные, карбидные, боридные и другие) и назначению (износостойкие, жаропрочные, коррозионно-стойкие, для ядерных реакторов и др).

К числу наиболее распространенных керметов относятся материалы на основе оксида алюминия Al_2O_3 и тугоплавких металлов (Mo, Nb, W, Ta). Применяют также композиты Al_2O_3-Ni (Co, Fe). Разработаны керметы и на основе оксидов хрома, магния, а также диоксидов циркония, тория и урана.

Среди карбидных керметов наибольшее применение получили материалы на основе карбидов вольфрама и кобальта. В качестве основы применяют также карбиды титана, хрома, тантала, ниобия. Металлическими компонентами карбидных керметов служат кобальт, никель (иногда в сочетании с молибденом, ниобием, хромом и вольфрамом). Комплексом ценных эксплуатационных свойств обладают карбидтитановые керметы, которые по прочности значительно превосходят оксидные, а по длительной прочности — жаропрочные стали. Керметы на основе диборидов хрома и циркония обладают высоким сопротивлением тепловому удару.

Дисперсные керамические КМ находят широкое применение при изготовлении деталей машин ответственного назначения, эксплуатируемых при воздействии повышенных температур, для изготовления режущего инструмента, деталей фрикционного и антифрикционного назначения, штампов, фильер, матриц. Из коррозионно-стойких керамических КМ изготавливают подшипники и уп-

лотнения насосов для перекачки агрессивных сред, клапаны нефтяных скважин. Керметы на оксидной основе используют для изготовления защитных чехлов термопар для измерения температуры при плавке металлов.

Керамический материал на основе тугоплавких соединений урана, плутония или тория в сочетании с оксидами-разбавителями: BeO , MgO , Al_2O_3 , La_2O_3 представляет собой и горючее для ядерных реакторов. Из керамических материалов изготавливают запальные тепловыделяющие элементы реакторов.

Металлокерамические материалы на основе кремния и алюминия используют для изготовления деталей двигателей внутреннего сгорания.

Примером слоистых керамических КМ являются конструкции, состоящие из металлической основы с нанесенным на нее керамическим покрытием. Керамический компонент такого материала может быть нанесен на металл эмалированием, газопламенным напылением, разложением солей металлов с их последующим окислением.

5.5. РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Получение необходимого комплекса свойств материала (при использовании однородных материалов) сопряжено с определенными ограничениями. Без конкретного изменения методов получения традиционных конструкционных материалов трудно представить создание современных и будущих образцов техники. В этой связи композиционные материалы являются материалами будущего. С их появлением стал возможным селективный выбор свойств композитов, необходимых для каждой конкретной области их применения, и возникла потребность в проектировании таких материалов.

Процесс создания композиционного материала включает следующие стадии: формирование проектных исходных данных; выбор состава композита и технологии его производства; оценка основных свойств созданного материала и сравнение их с заданием на проектирование.

Исходные данные на проектирование включают следующие сведения:

1. Условия эксплуатации будущего изделия и соответствующие им механические, физические, химические и другие характери-

ки материала, которые определяют работоспособность изделия. Например, для ответственных высоконагруженных деталей самолетов первостепенными являются механические характеристики.

В этом случае разработчикам нового материала необходимо знать пределы его прочности, ползучесть, сопротивление динамическим нагрузкам, вязкоупругие свойства, чувствительность к надрезам, сопротивление усталости, параметры окружающей среды при эксплуатации изделий (влажность, степень разрежения, температуру воздуха и другие) и их влияние на свойства материала и т. д.

Важнейшими характеристиками материалов, предназначенных для изготовления прецизионных деталей, являются их тепловое расширение и износостойкость, а для теплозащитных покрытий космических аппаратов — теплопроводность и абляционные показатели.

Таким образом, условия эксплуатации изделий определяют комплекс требований к основным служебным и технологическим параметрам материалов.

2. Экономические параметры, включающие потребность в материале и предполагаемый объем производства материала и изделий из него, ресурс изделия и его ремонтпригодность, потребность в создании специального оборудования, наличие сырьевой базы основных компонентов композиции, расходы, связанные с транспортировкой сырья и готовых изделий, возможность использования отходов и т. д.

3. Социальные факторы, определяющие условия труда и степень его безопасности при изготовлении и применении материала и изделий из него, влияние производства на окружающую среду, необходимый уровень квалификации производственного персонала и подготовки квалифицированных кадров и др.

Выбор оптимального состава композиции и технологии изготовления этой композиции — важнейший этап конструирования материала. Успех разработки композиционного материала обеспечивается выполнением большого объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Выбор состава композиции — результат оптимизации объемного содержания матрицы и армирующих элементов. Лучший вариант определяют на основе информации, полученной на каждом предыдущем этапе конструирования. Сначала осуществляют ориентировочный выбор материала матрицы, основных наполнителей и арматуры, а также технологии формирования изделий.

Металлические матрицы обеспечивают высокую прочность, тепло- и электропроводность композиционных материалов, размерную стабильность изделий из них, но отличаются высокой плотностью, недостаточной износостойкостью и низкой химической стойкостью.

Полимерные матрицы при относительно низкой прочности и недостаточной теплостойкости характеризуются более высокой химической стойкостью и низкой плотностью. Термореактивные полимеры превосходят термопластичные по прочностным характеристикам, но хуже перерабатываются в изделия.

Керамические матрицы отличаются очень высокой термостойкостью, прочностью и жесткостью, но процессы их переработки в изделия энергоемки, а полученные изделия имеют высокую стоимость.

Создание высокопрочных конструкционных композитов с повышенными упругими характеристиками связано с использованием в качестве армирующих элементов волокон и усов. Обычно в композиции приходится использовать несколько армирующих элементов (наполнителей), так как одно и то же вещество может одновременно улучшать одни свойства материала и ухудшать другие.

Определение содержания и относительного расположения различных армирующих элементов в матрице, прежде всего, зависит от таких исходных требований, как прочность и жесткость, тепло- и электропроводность, технологичность, стоимость материала и т. д. Часто процессы формирования изделия и композиционного материала совмещаются.

Технологию изготовления композита выбирают, прежде всего, по таким параметрам, как необходимые производительность оборудования и площадь помещения, квалификация производственного персонала, требования техники безопасности и охраны природы.

Возможность переработки композита зависит, прежде всего, от состава материала матрицы, геометрических, прочностных и других характеристик армирующих элементов. Важной его характеристикой является технологичность — комплекс технологических и конструктивных параметров, достигаемых в процессе создания материала и конструкции и обеспечивающих заданные эксплуатационные качества продукции и максимальную производительность процессов при минимальных затратах труда и сырьевых ресурсов. Например, полимерные композиты с порошковыми и коротковолокнистыми напол-

нителем перерабатывают в изделия наиболее производительным способом, т. е. литьем под давлением и экструзией; композиты из смесей металлических и керамических порошков — высокотемпературным спеканием; высокопрочные изделия изготавливают путем намотки из волокон или жгутов каркаса, который затем пропитывают связующим веществом и отверждают или спекают; сложные композиты с армирующими элементами из ткани и фольги — прямым прессованием.

В настоящее время все чаще при производстве крупногабаритных изделий используется промежуточная стадия подготовки компонентов композиционных материалов. Она включает изготовление полуфабрикатов, которые представляют собой волокнистые, жгутовые или тканевые армирующие элементы, смешанные с порошками. Эти порошки пропитаны растворами или расплавами матричных материалов (полимеров, металлов) и термически обработаны таким образом, что их можно подвергать дальнейшей переработке в изделия под давлением при нагреве (контактным формованием, прямым прессованием, намоткой с опрессовкой и т. д.).

Конструкционные материалы находят широкое применение при изготовлении общественного транспорта, автомобилей, судов, самолетов и ракет, емкостей для хранения жидкостей, снаряжения для активного отдыха, а также в различных областях электроники и медицины. Эти материалы используются для создания трубопроводов и стволов артиллерийских орудий, а также в приборостроении и как отделочные материалы.

Примером высоких достижений производителей конструкций из полимерных КМ в XX веке стали крупногабаритные трехслойные створки отсека полезного груза многоэтажного космического корабля «Буран» и толстостенные углепластиковые панели крыла обратной стреловидности высокоманевренного самолета Су-47 «Беркут». Композиционные материалы также использованы в деталях и агрегатах крыла, фюзеляжа и хвостового оперения, панелях пола и внутреннего интерьера для пассажирских самолетов Як-42, Ил-114, Ту-204, -224, -334, спортивных самолетов Су-26, -29, -31 и вертолетов (Ми-8).

В XXI веке прошли экспериментальную апробацию изготовленные из КМ стрингерные панели крыла высокоманевренного самолета Су-33; стрингерные панели крыла, киля, кессоны руля направ-

лений и гидрошпангоут гидросамолетов Бе-40 и Бе-200; многие детали самолета Ту-334. Данные материалы в планерах самолетов значительно «потеснили» металлы и продемонстрировали свое превосходство над ними при длительной эксплуатации авиационной техники. Самый современный пассажирский авиалайнер «Боинг-787» созданный совместными усилиями конструкторов многих стран, на 50 % состоит из композиционных материалов.

Следует отметить, что в короткие сроки реализовано производство большой номенклатуры изделий для ракетносителей «Протон-М», «Рокот» и «Ангара» (оболочки головных обтекателей, обтекатели ступеней, приборные рамы и воздухопроводы). Доля углепластиков, применяемых в конструкциях этих ракетносителей, составляет 20...90 % других материалов. Это позволило уменьшить массу ракетносителей (на 16...33 %). Кроме того, использование КМ позволяет совершенствовать корпусные конструкции ракетносителей и достигать по сравнению с металлическими аналогами повышения жесткости на 15 %; улучшения акустических характеристик головных обтекателей в 2 раза; увеличения габаритных размеров отсеков, изготавливаемых без технологических стыков; сокращения технологического цикла изготовления не менее чем в 1,5 раза.

Следует отметить, что созданы размеростабильные трубы каркаса и оболочки зеркала крупногабаритного космического радиотелескопа. Осуществляется разработка размеростабильной интегральной платформы из углепластика для российско-американского космического аппарата «Ramos». Основная часть тепловой энергии от работающих приборов на борту космических аппаратов отводится системой тепловых труб, расположенных в специальных трехслойных панелях.

Все увеличивающаяся доля КМ, используемых в авиации, космической технике и энергетике свидетельствует о том, что разработка и использование подобных материалов является одним из путей создания новой техники. В этой связи будут развиваться новые классы КМ и технологии получения данных материалов. Одним из перспективных направлений в этой области является создание новых КМ с использованием нанотехнологий.

6. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

Совершенствование машин, механизмов, приборов предполагает создание материалов с особыми свойствами. В современном машиностроении широко используются стали и сплавы, обладающие особыми свойствами (заданной проводимостью, сверхпроводимостью, полупроводниковыми и магнитными свойствами, способностью восстанавливать заданную форму изделия и т. д.). Специальные свойства таких материалов обусловлены определенным соотношением компонентов сплава, особенностями строения элементов, входящих в его состав, структурным состоянием материала.

6.1. АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ

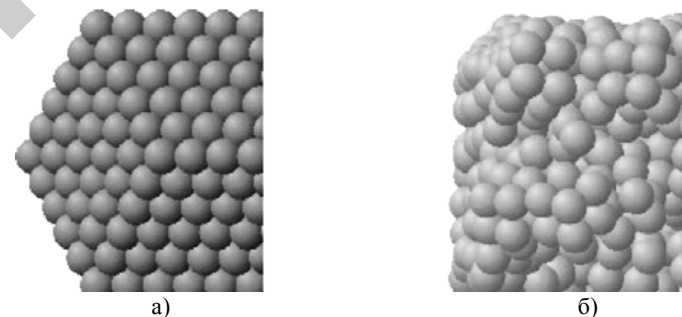
Большинство металлов и сплавов, используемых в промышленности, имеют кристаллическую структуру. Им присуще упорядоченное строение кристаллических образований (рис. 6.1, а). В процессах кристаллизации расплавов металлов их охлаждение происходит за какой-то промежуток времени, с которым связаны два основных параметра: скорость зарождения центров кристаллизации и скорость роста кристаллов. При этом образуются кристаллические структуры с анизотропией свойств, связанной с тем, что блоки, зерна имеют границы, на которых концентрируются дефекты и другие явления.

Во второй половине XX века было установлено, что при сверхвысоких скоростях охлаждения вещества из жидкого состояния (со скоростью $> 10^6$ °C/с) диффузионные процессы и зарождение центров кристаллизации в нем настолько замедляются вследствие быстрого нарастания вязкости расплава, из-за чего подавляется образование зародышей и рост кристаллов. В этом случае при затвердевании образуются неупорядоченные структуры (рис. 6.1, б).

Сплавы с такой структурой получили название аморфные металлические сплавы или металлические стекла. Аморфные металлические сплавы полностью изотропны, их свойства во всех направлениях совершенно одинаковы.

Аморфное состояние обеспечивает металлическим материалам свойства, значительно отличающиеся от свойств соответствующих материалов с кристаллической структурой.

Сплавы в аморфном состоянии обладают высокой твердостью и коррозионной стойкостью, а их пластическая деформация не сопровождается скольжением или двойникованием и имеет характер вязкого, очень затрудненного течения. Следует отметить, что уровень электромагнитных потерь в аморфных сплавах с высокой магнитной индукцией оказывается существенно ниже, чем во всех известных кристаллических сплавах.



а) б)

Рис. 6.1. Модели структур сплавов:
а — кристаллическая; б — аморфная

Сверхвысокие скорости охлаждения жидкого сплава для получения его аморфной структуры можно реализовать различными способами. Общим в них является необходимость обеспечения скорости охлаждения не ниже 10^6 °C/с.

Существует много методов получения аморфных сплавов (катапультирование капли на холодную пластину, распыление струи газом или жидкостью, центрифугирование капли или струи, расплавление тонкой пленки поверхности металла лазером с быстрым отводом тепла массой основного металла, сверхбыстрое охлаждение из газовой среды и др.). Эти сплавы можно получать из газовой, жидкой и твердой фаз. Следует отметить, что подавляющее большинство аморфных сплавов получают путем быстрой закалки из расплава (технология быстрого затвердевания).

Использование этих методов позволяет получать ленту (различной толщины), проволоку и порошки с аморфной структурой.

Наиболее эффективными способами промышленного производства аморфной ленты являются охлаждение струи жидкого металла на внешней (закалка на диске) или внутренней (центробежная закалка) поверхности вращающихся барабанов и прокатка расплава между холодными валками, изготовленными из материалов с высокой теплопроводностью.

На рисунке 6.2 приведены принципиальные схемы этих методов. Расплав, полученный в индукционной печи, выдавливается нейтральным газом из сопла и затвердевает при соприкосновении с поверхностью вращающегося охлаждаемого тела (холодильника). Различие в методах состоит в том, что при центробежной закалке и закалке на диске расплав охлаждается только с одной стороны. Основной проблемой здесь является получение достаточной степени чистоты внешней поверхности, которая не соприкасается с холодильником. Метод прокатки расплава позволяет получить хорошее качество обеих поверхностей ленты, что особенно важно для аморфных лент, используемых для головок магнитной записи. Для каждого метода имеются свои ограничения по размерам лент, поскольку имеются различия и в протекании процесса затвердевания, и в аппаратном оформлении методов. Если при центробежной закалке ширина ленты составляет до 5 мм, то прокаткой получают ленты шириной 10 мм и более. Метод закалки на диске, для которого требуется более простая аппаратура, позволяет в широких пределах изменять ширину ленты в зависимости от размеров плавильных тиглей. Данный метод позволяет изготавливать как узкие (шириной 0,1...0,2 мм), так и широкие (до 100 мм) ленты, причем точность поддержания их ширины может составлять ± 3 мкм.

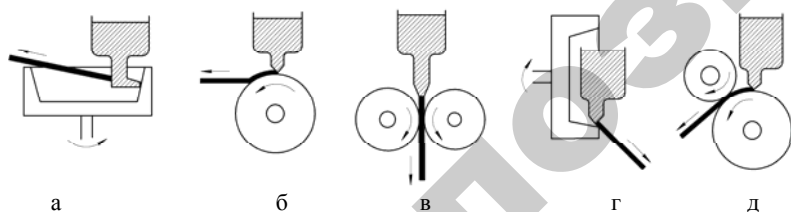


Рис. 6.2. Методы получения тонкой ленты путем закалки из расплава: а — центробежная закалка; б — закалка на диске; в — прокатка расплава; г — центробежная закалка; д — планетарная закалка

Во всех установках для закалки из жидкого состояния сплав быстро затвердевает, растекаясь тонким слоем по поверхности вращающегося холодильника. При постоянстве состава сплава скорость охлаждения расплава зависит от его толщины и характеристик холодильника. Толщина расплава на холодильнике определяется скоростью его вращения и скоростью истечения расплава, т. е. зависит от диаметра сопла и давления газа на расплав. Большое значение имеет правильный выбор угла подачи расплава на диск, позволяющий увеличить длительность контакта сплава с холодильником. Скорость охлаждения зависит также от свойств самого расплава (теплопроводности, теплоемкости, вязкости, плотности).

Для получения тонкой аморфной проволоки используют различные методы вытягивания волокон из расплава.

В методе, представленном на рисунке 6.3, а, расплавленный сплав протягивается в трубке круглого сечения через водный раствор солей. В методе вытягивания нити из вращающегося барабана (рис. 6.3, б) струя расплавленного сплава падает в жидкость, удерживаемую центробежной силой на внутренней поверхности вращающегося барабана: затвердевшая нить затем сматывается из вращающейся жидкости.

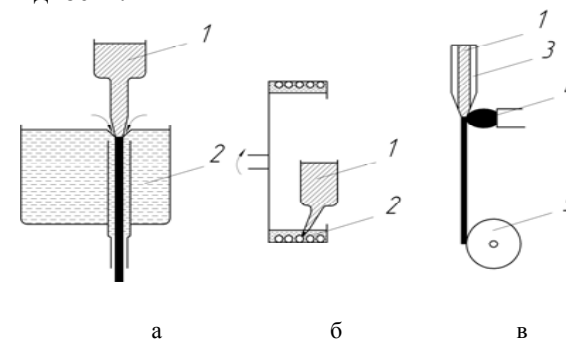


Рис. 6.3. Методы получения тонкой проволоки из расплава: а — протягивание расплава через охлаждающую жидкость (экструзия расплава); б — вытягивание нити из вращающегося барабана; в — вытягивание расплава в стеклянном капилляре; 1 — расплав; 2 — охлаждающая жидкость; 3 — стекло; 4 — форсунка; 5 — барабан

Известен метод, состоящий в получении аморфной проволоки путем максимально быстрого вытягивания расплава в стеклянном

капилляре (рис. 6.3, в). Этот метод также называют методом Тейлора. Волокно получается при протягивании расплава одновременно со стеклянной трубкой. При этом диаметр волокна составляет 2...5 мкм. Недостатком метода является сложность отделения волокна от покрывающего его стекла, что ограничивает составы сплавов, которые аморфизируются данным методом. (сюда рис.6.3)

Следует отметить, что для производства порошков аморфных сплавов можно воспользоваться методами и оборудованием, применяемыми для изготовления обычных металлических порошков.

На рисунке 6.4 схематично показано несколько методов, позволяющих в больших количествах получать аморфные порошки. Среди них, в первую очередь, следует отметить хорошо зарекомендовавшие себя методы распыления (рис. 6.4, а).

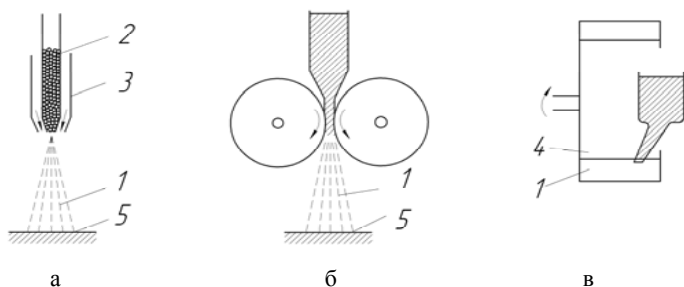


Рис. 6.4. Методы получения аморфных порошков:

а — метод распыления (спрей-метод); б — кавитационный метод; в — метод распыления расплава вращающимся диском; 1 — порошок; 2 — исходное сырье; 3 — форсунка; 4 — охлаждающая жидкость; 5 — охлаждаемая плита

Изготовление аморфных порошков осуществляется также кавитационным методом, реализуемым прокаткой расплава в валках, и методом распыления расплава вращающимся диском.

При кавитационном методе (рис. 6.4, б) расплавленный металл выдавливается в зазор (0,2...0,5 мм) между двумя валками, изготовленными, например, из графита или нитрида бора. Происходит кавитация — расплав выбрасывается валками в виде порошка, который попадает на охлажденную плиту или в охлаждающий водный раствор. Кавитация возникает в зазоре между валками, вследствие чего исчезают пузырьки газа, имеющиеся в металле.

Метод распыления вращающимся диском (рис. 6.4, в) аналогичен методу изготовления тонкой проволоки, но здесь расплавленный металл, попадая в жидкость, разбрызгивается за счет ее турбулентного движения. При помощи этого метода получается порошок в виде гранул диаметром около 100 мкм. (сюда рис.6.4)

Превращение поверхностного слоя расплава в аморфное состояние затруднено наличием кристаллической подложки, способной инициировать процесс кристаллизации. Поэтому для обеспечения аморфизации расплава следует увеличивать скорость его охлаждения, что достигается уменьшением глубины проплавления, которая обычно не превышает 50 мкм. Скорости охлаждения, достигаемые при лазерной аморфизации, составляют 10^6 °C/с и более.

Для поверхностной аморфизации сплавов применяют не только лазерный луч, но и электронный, сфокусированный магнитным полем. При этом можно получить очень высокую плотность энергии, но обработку необходимо проводить в вакуумных камерах. Такая обработка наиболее широко применяется для сталей, особенно инструментальных.

В настоящее время известно множество аморфных сплавов на основе Fe, Ni, Ti, Cu и т. д. Как правило, гораздо легче аморфизируются сплавы, содержащие аморфизующие добавки некоторых неметаллических элементов (металлоидов типа P, Si, B, C и др.). Это сплавы составов $Fe_{80}B_{20}$, $Fe_{10}Cr_{10}B_{20}$, $Ni_{75}Si_8B_{17}$, $Co_{75}Si_{15}B_{10}$, $Pd_{80}Si_{20}$ и др. Из сплавов, содержащих только металлические элементы, легче аморфизируются те, которые состоят из элементов с сильно различающимися размерами атомов и их значениями электроотрицательности ($Ni_{35}Nd_{65}$, $Ni_{55}Ta_{45}$, $Cu_{50}Zr_{50}$, $Co_{60}Zr_{40}$ и др.). Аморфизацию сталей в настоящее время проводить затруднительно, поскольку для этого необходимы очень большие скорости охлаждения.

Следует отметить, что сортамент выпускаемых аморфных материалов ограничен (изготавливаются только тонкие ленты, фольга и нити), а получить массивные заготовки и изделия можно методами порошковой металлургии. Вместе с тем обычная технология (спекание порошковых заготовок) неприемлема из-за низкой термической стабильности аморфных материалов. Экспериментально аморфные порошки изготавливают взрывным прессованием.

Срок службы аморфного сплава зависит от температуры его эксплуатации. Термическая стойкость аморфных сплавов низка. Однако

имеются материалы с $t_{\text{крист}}$ более 725 °С. К ним, в частности, относится сплав $\text{Ti}_{40}\text{Ni}_{40}\text{Si}_{20}$, который обладает высокими механическими свойствами.

Высокопрочные нити из аморфных сплавов могут использоваться в композиционных материалах, а ленты — в виде намотки для упрочнения сосудов высокого давления.

Аморфные металлические сплавы являются перспективным материалом для изготовления упругих элементов.

Высокие твердость, износостойкость и коррозионная стойкость этих сплавов позволяют получать из них высококачественный тонколезвийный инструмент (например, бритвенные лезвия).

Методами быстрого затвердевания расплава при определенных условиях можно получать не только аморфные, но и микрокристаллические сплавы, обладающие высокими механическими свойствами при повышенных температурах. Размер зерна в таких сплавах обычно составляет 1...5 мкм, а иногда и менее.

Микрокристаллические сплавы можно также получать путем кристаллизации аморфных сплавов. Аморфное состояние в сплавах является термически неравновесным, поэтому при нагревании выше определенной температуры, зависящей от состава сплава, происходит его переход в кристаллическое состояние. Кристаллизация аморфных сплавов, специально разработанных для этих целей (например, содержащих только 5...13 % металлоида, как правило, бора) позволяет получать микрокристаллические сплавы с размером зерна менее 1 мкм.

Для получения микрокристаллических сплавов используют также аморфные сплавы в виде порошков, которые подвергаются горячему прессованию и одновременно кристаллизуются.

В настоящее время технологические возможности не позволяют получать металлические детали, имеющие аморфную структуру во всем их объеме. Однако развитие существующих технологий в перспективе позволит получать детали с аморфной структурой. Так, при жидкой штамповке на расплав оказывается давление 150...200 МПа, но если его повысить на порядок и более, то могут произойти значительные изменения структуры отливок. С увеличением давления температура плавления большинства металлов и сплавов повышается. Поэтому, если сплав при нормальном давлении находится в жидком состоянии, то его можно перевести в твердое состояние при постоян-

ной температуре за счет только высокого давления. Поскольку давление в жидкостях передается во всех направлениях без изменения, то можно теоретически по всему объему сплава создать переохлаждение, необходимое для одновременной кристаллизации всей отливки. Принципиально возможно создание таких давлений, при которых вязкость расплава возрастет настолько, что из-за малой подвижности атомы не успеют занять места в узлах кристаллической решетки и вместо кристаллической структуры получится аморфная.

6.2. МАТЕРИАЛЫ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Материалы с *эффектом памяти формы* являются прототипами так называемых «интеллектуальных» материалов будущего. «Интеллектуальные» материалы, помимо обычных, присущих традиционным материалам свойств (например, для металлов — механических свойств), обладают и функциональными свойствами. Одним из таких свойств (из набора функциональных свойств) является свойство датчика (сенсора), которое позволяет материалу реагировать на изменение окружающей среды. К этому набору относятся и свойство процессора, т. е. возможность оценить ситуацию и сделать выводы, и, наконец, исполнительное свойство (актуатор), при котором материал совершает действие или подает сигналы.

Эффект памяти формы (ЭПФ) металлов — это физическое явление, при котором пластически деформированный металл восстанавливает свою первоначальную форму (которая у него была до деформации), как правило, при нагреве.

Так, если стальную проволоку или пластину, изогнутую под прямым углом, пластически деформируя ее, выпрямить, то снова придать этой проволоке или пластине первоначальную форму (т. е. изогнутой под прямым углом конструкции) другим путем (кроме ее деформирования в обратном направлении) невозможно.

Эффект памяти формы задается проволоке (пластине), изготовленной из специального сплава при высокой температуре, т. е. согнутая под углом проволока или пластина нагревается и после ее охлаждения из высокотемпературного состояния, называемого аустенитным, получается охлажденное состояние металла, называемое мартенситным. Для металлических сплавов различие данных

состояний заключается в различии кристаллических решеток, при этом оба состояния стабильны при соответствующих температурах.

В мартенситном состоянии проволоку (образец) пластически деформируют (выпрямляют). Если проволоку нагреть (перевести в аустенитное состояние), то она «вспомнит» свое первоначальное состояние, которое у нее было при высокой температуре. При этом вся пластическая деформация (следует отметить, что восстанавливаемая пластическая деформация является заданной для каждого материала с ЭПФ) исчезнет и образец может совершить достаточную механическую работу (например, поднять груз или привести в действие выходное звено механического устройства). Такой процесс в материале при термоциклировании, называется прямым (обратным) мартенситным превращением при охлаждении (соответственно нагреве) материала.

Следует отметить, что существует обширный класс материалов, которые обладают эффектом памяти формы. Такой эффект характерен для сплавов Ti-Ni, Ti-Au, Ti-Pd, Ti-Pt, Au-Cd, Cu-Zn и др. Наиболее типичным представителем подобных материалов является сплав Ti-Ni (нитинол).

В связи с резким расширением сферы применения сплавов с ЭПФ и необходимостью обеспечения экономичности их производства практическое применение нашли тройные сплавы на основе меди (Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al и Cu-Al-Mn). Стоимость сплавов на основе меди не превышает 10 % от стоимости сплавов на основе никелида титана. Температурные интервалы проявления ЭПФ в этих сплавах могут варьироваться в широких пределах (от -150 до +100 °C) путем изменения химического состава и регулировкой режимов термообработки.

Сплавы с эффектом памяти формы используются для создания малогабаритных приводов и устройств, способных развивать сравнительно большие усилия и моменты. Для проектирования таких устройств необходимо, в первую очередь, знать параметры сплава с ЭПФ, а именно:

- 1) деформацию или величину перемещения сплава с памятью при мартенситных превращениях;
- 2) генерируемое сплавом напряжение или возможное развиваемое усилие для совершения механической работы;

- 3) характеристические температуры или интервал начала и конца мартенситных превращений;
- 4) скорость протекания мартенситных превращений;
- 5) циклическую прочность или количество циклов срабатывания и т. д.

В настоящее время сплавы с ЭПФ используются:

- 1) в силовом оборудовании и самосооружающихся трансформируемых конструкциях;
- 2) в мартенситных преобразователях энергии (мартенситные приводы и мартенситные двигатели);
- 3) в системах автоматического регулирования расхода тепла и температуры;
- 3) в устройствах защиты (тепловой, электрической и пожарной);
- 4) в элементах робототехники;
- 5) при создании неразъемных соединений;
- 6) в медицине;
- 7) для изготовления самораскрывающихся антенн космических кораблей и т. д.

Производители современной техники постоянно расширяют области применения таких сплавов. Компания «Дженерал моторс» (США) получила 175 патентов на материалы с ЭПФ.

Конструкции из таких материалов работают без внешних приводов, например, дефлектор (рис. 6.5), шторки которого меняют положение при изменении температуры. Так, при повышении температуры шторки раскрываются (рис. 6.5, а), а с понижением — закрываются (рис. 6.5, б).

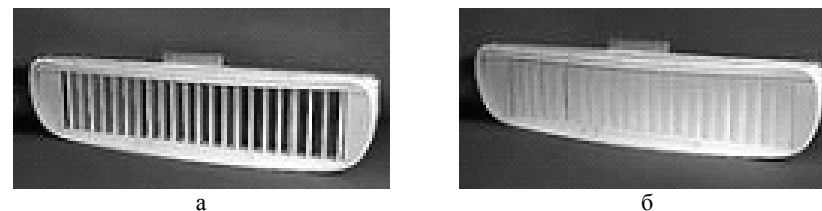


Рис. 6.5. Дефлектор в различных рабочих положениях:
а — «открыто»; б — «закрыто»

Комплексный подход в использовании традиционных приводов и приводов на основе материалов с ЭПФ позволяет создавать уникаль-

ные робототехнические системы, которые обладают миниразмерами. Например, разработан мини-робот (рис. 6.6) имеющий габаритные размеры $80 \times 40 \times 50$ мм, весом 80 г, с манипулятором на базе материалов с эффектом памяти формы. Этот робот способен оперировать объектами различной формы весом до 100 г.

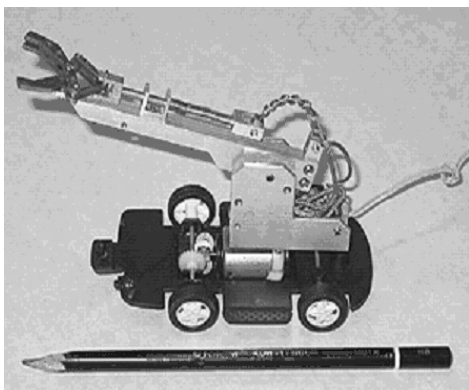


Рис. 6.6. Мини-робот с приводом на основе материалов с ЭПФ

Плавность действия робота обусловлена тем, что заданная величина усилия (силы восстановления формы) определяется регулируемой температурой и не зависит от положения элементов, что приближает действие робота к действию мускульного механизма.

6.3. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

Учитывая то, что технологии и материалы играли значительную роль в развитии цивилизации и выполняли не только узкопроизводственные, но и социальные функции ученые давали большим промежуткам времени существования человечества соответствующие названия (каменный век, бронзовый век, железный век, эра электричества и т. д.). В этой связи многие эксперты считают, что двадцать первому столетию суждено носить название «века нанонауки и нанотехнологий».

Нанонауку можно определить как совокупность знаний об особенностях поведения вещества в нанометрическом масштабе размеров, а нанотехнологии — как искусство создавать и оперировать объекта-

ми с размерами в диапазоне от долей до сотен нанометров (хотя бы в одном или трех измерениях).

Приставка «нано» означает одну миллиардную. Один 1 нанометр (сокращенно 1 нм) равен $1/1\,000\,000\,000$ метра. Один миллиметр (минимальная величина, используя которую люди привыкли оценивать размеры окружающих их предметов) в миллион раз больше нанометра. Наименьшие элементы, которые способен разглядеть невооруженный человеческий глаз, составляют 10 000 нм. Толщина человеческого волоса составляет примерно 50 000 нм. Один нанометр — это ряд из десяти атомов водорода (к примеру, многие вирусы имеют размер 10 нм). Следует отметить, что характерный размер многих белковых молекул составляет примерно 1 нм, а все то, что меньше нанометра — это просто свободный атом или небольшая молекула.

В настоящее время сложилась ситуация, когда между макроуровнем, где действуют хорошо разработанные теории сплошных сред и инженерные методы расчета и конструирования, и атомарным, подчиненным законам квантовой механики, находится обширный малоисследованный мезоиерархический (mesos (греч.) — средний, промежуточный) уровень структуры материи. На этом уровне протекают жизненно важные биохимические процессы между макромолекулами ДНК, РНК, белков, ферментов, субклеточных структур, требующие более глубокого изучения и понимания. Вместе с тем здесь могут быть искусственно созданы новые продукты и технологии, способные радикально изменить жизнь всего человеческого сообщества. При этом не потребуются больших затрат сырья и энергии (как и средств для транспортировки), уменьшится количество отходов и загрязнение окружающей среды, труд станет более интеллектуальным и здоровым.

Причиной поисков возможностей изучить закономерности процессов, происходящих в наноскопическом диапазоне, и управлять ими — является уникальность именно этого диапазона размеров. Таким образом, наноструктуры не просто меньше всего того, что человек делал раньше, а наименьшие твердые материалы, которые можно сделать. Наномасштаб уникален еще и потому, что в этом масштабе размеров привычные и стабильные значения свойств материалов (температура плавления, твердость, проводимость и другие) нестабильны или не соответствуют общепринятым. Это связано с тем, что в наномире свойства материалов во многом опреде-

ляются воздействием характеристик атомов и молекул (корпускулярно-волновой дуализм, квантовые эффекты и др.). Например, закон Ома, являющийся основой современной электроники, связывает силу тока, напряжение и сопротивление, но он действителен, если электроны «текут» по проводу, как вода в реке, чего они (электроны) не смогут сделать, если провод имеет в ширину один атом и электроны должны проходить его по одному. Такая связь размера с наиболее фундаментальными химическими, электрическими и физическими свойствами материалов является ключевой для всех наноструктур.

Хорошее определение нанонауки и нанотехнологии приводится в выпущенном в 2001 г. документе Национального научного фонда США. Согласно этому определению один нанометр — это магическая точка на шкале размеров. Наноструктуры находятся на слиянии наименьших из сделанных человеком устройств и наибольших молекул живых организмов. Наукой и технологией в наномасштабе называется фундаментальное понимание и получаемые вследствие него технологические преимущества, возникающие при использовании новых физических, химических и биологических свойств систем, промежуточных по размеру между отдельными атомами и молекулами и массивными материалами, где можно контролировать свойства, промежуточные между двумя граничными состояниями.

Следует отметить, что и до наступления эры нанотехнологий человек использовал объекты и процессы на наноуровне. Например, биохимические реакции между макромолекулами, из которых состоит все живое, получение фотографических изображений, катализ в химическом производстве, бродильные процессы при изготовлении вина, сыра, хлеба и т. д. происходят на наноуровне. Так, в состав противозагарного крема, выпущенного в 80-х годах XX века, входили наночастицы TiO_2 , рассеивающие ультрафиолетовое излучение Солнца. Рассеяние излучения происходило потому, что размеры частиц не превышали 400 нм, то есть длины волн этих лучей.

Если взять кубик золота с размером грани 10 см и распилить его на восемь частей, а каждую полученную часть кубика опять делить на восемь частей, то каждый раз будут получаться кусочки кубика, которые имеют желтый цвет. Но если размер получаемых кусочков приблизится к наноразмерам, то цвет кусочков золота станет ме-

няться (от зеленого, красного, оранжевого до пурпурного). Крошечные золотые наноструктуры, полученные таким образом, иногда называют квантовыми точками или наноточками. Если эти частицы вновь соединить, то они опять станут желтого цвета.

Цвет многих витражных стекол средневековых церквей был получен диспергированием в стекольной массе наночастичек. Таким образом, можно предположить, что средневековые стеклодувы были одними из первых нанотехнологов. Очевидно, что стеклодувы не понимали, почему золото меняет цвет. Однако развившаяся стихийно «интуитивная нанотехнология» без должного понимания природы используемых объектов и процессов не может быть надежной основой в будущем. Поэтому первостепенное значение имеют фундаментальные исследования, направленные на создание принципиально новых технологических процессов и продуктов. Ожидается, что нанотехнологии смогут заменить некоторую часть морально устаревших и неэффективных технологий, но все-таки ее «законное» место находится в новых областях, где традиционными методами достигнуть требуемых результатов невозможно в принципе.

Для осознанного манипулирования нанообъектами необходимы наблюдения за этими объектами и их измерение (т. е. соответствующие приборы), а также технологии, позволяющие получать наноструктуры и перемещать их.

Для наблюдения мельчайших объектов в конце XIX века был изобретен оптический микроскоп. Но минимальные наблюдаемые в нем объекты не могли быть меньше длины волны излучаемого света, диапазон которой соответствует примерно 400 нм, а разрешающая способность ограничена половиной этой величины и составляла около 200 нм. В 40-е годы XX века в связи с развитием теории волновой природы электрона был создан электронный микроскоп. Электронные микроскопы делятся на сканирующие (СЭМ) и просвечивающие (ПЭМ). В 70...80-е гг. XX века были созданы сканирующие туннельные микроскопы (СТМ), атомарно-силовые микроскопы (АСМ) и реализована идея сканирующего оптического микроскопа ближнего поля (СОМБП) с разрешающей способностью до 20 нм. Разрешающая способность современных ПЭМ составляет около 0,2 нм, СЭМ — около 0,5 нм, а микроскопы СТМ позволяют изучать объекты размером 0,1 нм.

Микроскопы СТМ, АСМ и СОМБП относятся к сканирующим зондовым микроскопам, характерной особенностью которых является то, что они сканируют поверхность исследуемого образца с помощью зонда в виде крошечной металлической иглы. Кроме наблюдения объектов, зондовые микроскопы стали использовать для обработки поверхностей и для целенаправленной манипуляции отдельными атомами и молекулами (рис. 6.7). Зонд АСМ можно использовать в качестве «пера», на кончике которого вместо чернил находятся атомы или молекулы. Нанолитография с помощью такой «ручки» позволяет строить на поверхности вещества сложные структуры.

Следует отметить, что нанолитография с использованием зондов сканирующих микроскопов, когда нанообъекты (в том числе атомы и молекулы) подталкивают или перемещают, поднимая их на зонд, эффективна для создания новых и сложных структур в малых объемах, но она пока еще достаточно дорога и медлительна.

Молекулярный синтез, т. е. производство молекул с конкретными молекулярными структурами является одной из наиболее распространенных отраслей химии. Молекулярный синтез включает создание специфических молекул для специальных или научных целей. Применяется он при производстве медикаментов и множество современных лекарств (пенициллин, виагра и другие), которые являются продуктами сложного химического синтеза.

Следующим шагом в развитии технологий формирования синтезированных молекул является производство наноструктур с определенными геометрическими формами в указанных местах поверхности. Так, при использовании лекарственных препаратов важен путь их попадания к месту воздействия. Для доставки препарата к месту его непосредственного воздействия на организм препарат нужно поместить в молекулярную оболочку. При этом между лекарством и оболочкой не должно быть химической связи. Такая форма лекарственных препаратов позволит проникать им в такие части тела, куда проникнуть раньше эти препараты не могли.

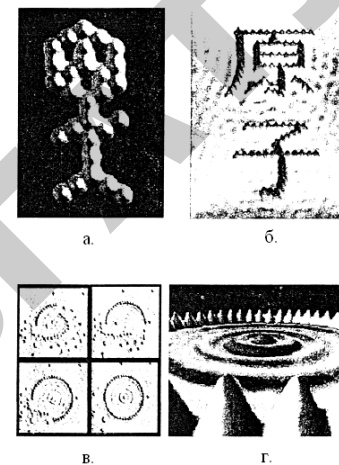


Рис. 6.7. Атомарный дизайн, выполненный в сканирующем микроскопе: а — «пляшущий человечек», выложенный молекулами монооксида углерода; б — иероглифы, выложенные атомами железа на поверхности меди; в — поатомная сборка «квантового загона» для электрона, состоящая из 48 атомов железа на поверхности кремния, выполненная методом атомарного дизайна в SPM; г — в собранном «загоне» видны стоячие волны электронной плотности захваченного ловушкой электрона

Следует отметить, что вся техника для производства наноструктур, включающая манипуляцию отдельными атомами, действует слишком медленно и является громоздкой. Это особенно неудобно, когда нужно создать большую массу материала. Проблема большинства технологий при сборке наноструктур в настоящее время заключается в том, что они очень напоминают ручной труд.

Существующую сейчас технологическую парадигму (парадигма — теория, воплощенная в системе понятий, выражающих существенные черты действительности) в обработке вещества условно можно называть технологиями «сверху–вниз».

Подход «сверху–вниз» основан на уменьшении размеров физических тел механической или иной обработкой для получения деталей или других объектов. Таким же образом в настоящее время получают и объекты с ультрамикроскопическими, нанометровыми параметрами. К примеру, можно указать некоторые полупроводниковые устройства, структура которых создается фотолитографической обработкой. При фотолитографии полупроводниковая заготовка подвергается обработке

лазерным лучом, что позволяет получить в заготовке заранее спланированную конфигурацию схемы. Разрешающая способность (т. е. минимальный размер элементов изготавливаемой схемы) определяется при этом длиной волны лазерного излучения. В настоящее время самые короткие длины такого излучения позволяют осуществлять микрообработку с точностью до 100 нм, но эта технология является сложной и требует дорогого оборудования, из-за чего она малоприменяется для организации эффективного крупномасштабного производства.

Сущность технологии «снизу–вверх» заключается в том, что сборка создаваемой «конструкции» осуществляется непосредственно из элементов «нижнего порядка» (атомов, молекул, структурных фрагментов биологических клеток и т. п.), располагаемых в требуемом порядке. Этот подход можно считать «обратным» по отношению к традиционному методу миниатюризации (подходу «сверху–вниз»), когда просто уменьшают размеры деталей.

Примером подхода «снизу–вверх» может служить метод поштучной укладки атомов на кристаллической поверхности при помощи сканирующего туннельного микроскопа или других устройств этого типа (рис. 6.8).

Метод позволяет наносить друг на друга не только отдельные атомы, но и слои атомов. Следует отметить, что в настоящее время описываемый подход похож на ручную сборку и характеризуется очень малой эффективностью и низкой производительностью, но ему принадлежит будущее.

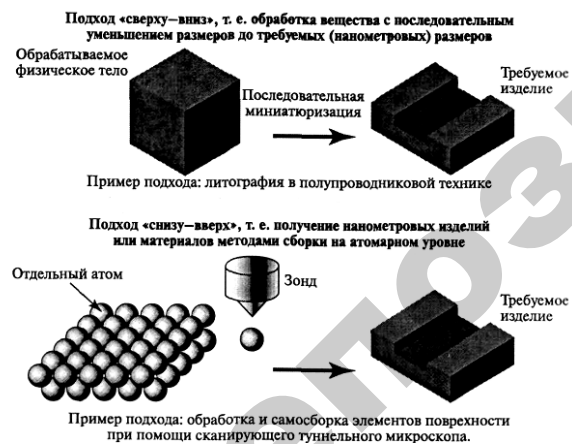


Рис. 6.8. Две технологические парадигмы

В природе у живых организмов биологические клетки образуются в результате деления (митоза). С точки зрения предлагаемого подхода интересно рассмотреть то, в какой степени и как атомы способны «самостоятельно» объединяться в более сложные вещества.

Следует отметить, что сборка «снизу–вверх» (самоорганизация вещества) является довольно распространенным явлением, а разнообразные взаимодействия атомов и молекул способны приводить к образованию высокоупорядоченных соединений из исходных гомогенных смесей. Примером являются живые организмы, способные усваивать «мертвые» клетки других организмов и перерабатывать их в новые «живые» клетки.

В живых организмах существуют различные клеточные структуры в виде нанотрубок, кристаллов и т. п. Образование таких структур не может протекать «сверху–вниз» и связано с процессами самоорганизации. Структурирование и сборка биологических тканей происходят на атомарно-молекулярном уровне, причем живые организмы осуществляют их с высокой эффективностью. Это означает, что низкая эффективность существующих процессов «снизу–вверх» свидетельствует лишь о недостаточном техническом мастерстве и может быть преодолена.

Одним из путей решения проблемы производства значительного количества наноструктурированных материалов является создание технологии, при осуществлении которой, смешав химикаты и позволив молекулам «рассортировать себя», можно было бы получить требуемые наноструктуры за короткое время. Такой метод их получения называется самосборкой и основывается на том, что молекулы стремятся перейти на самый нижний уровень из доступных для них уровней энергии. Множество молекул с одинаковым нижним уровнем энергии, собравшись вместе, естественно организуют себя. Силы, задействованные в самосборке, обычно слабее связывающих сил, задействованных вместе, и соответствуют более слабым аспектам кулоновского взаимодействия. Эти силы используются в природе повсеместно.

Например, слабые взаимодействия, называемые водородной связью, связывают атом водорода в одной молекуле жидкой воды с атомом кислорода другой и не позволяют молекулам стать водяным паром при комнатной температуре. Водородные связи также помогают удерживать белки в определенной трехмерной структуре,

что необходимо для выполнения их биологических функций. Существуют и другие слабые взаимодействия, включая гидрофобные взаимодействия, позволяющие маслу (нефти) разливаться по поверхности воды.

Мультиполярные взаимодействия возникают между структурами, каждая из которых не имеет полного заряда (что не похоже на электронное взаимодействие с другим электроном, которое является сильным кулоновским взаимодействием). Однако здесь наблюдается иное распределение по двум взаимодействующим молекулам. Такие обычно слабые мультиполярные взаимодействия достаточно сильны, чтобы создавать очень сложные структуры. При самосборке наноструктур определенные атомы или молекулы вводят на поверхность или ранее собранную наноструктуру. Затем молекулы выравнивают себя в определенных положениях, иногда формируя слабые связи, а иногда — сильные ковалентные связи, минимизируя общую энергию.

В будущем самосборка может стать предпочтительным методом создания больших наноструктурных массивов.

Еще одной разновидностью самосборки является наноскопическое выращивание кристаллов (рис. 6.9). Длинная палочка собирается из небольших молекулярных компонентов, а затем самосборкой формируется каркас.

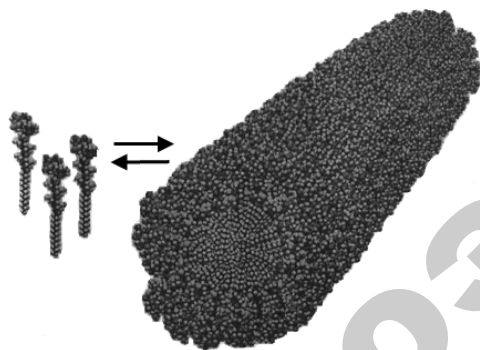


Рис. 6.9. Самособирающийся молекулярный шаблон искусственной кости

Полимеризация является широко используемой схемой для получения наноразмерных материалов. Эта технология используется для получения структур ДНК, белков (например, инсулина) и др.

Ученые, занимающиеся наноматериалами, обнаружили и научились получать материалы с уникальными свойствами. Одним из таких материалов являются наноконструкции на основе углерода.

Углерод является основой жизни на земле и существует в твердой фазе в нескольких модификациях, свойства которых резко отличаются (графит, алмаз, карбин, лонсдейлит). Следует отметить, что карбин и лонсдейлит были получены искусственно, но последний был обнаружен и в метеоритах. Важная особенность углерода (способность образовывать цепочки $-C-C-C-$) используется человеком для создания синтетических полимеров и разнообразных пластмасс (в природе эта способность приводит к образованию биополимеров).

В 1985 г. было установлено, что в масс-спектрах паров графита, полученных его испарением под лазерным пучком, имеются ряд интенсивных пиков, отвечающих кластерам или многоатомным молекулам углерода.

Наиболее стабильными из них оказались C_{60} и C_{70} . Как выяснилось в результате структурного анализа, первый из них имел форму футбольного, а второй — регбийного мяча (рис. 6.10).

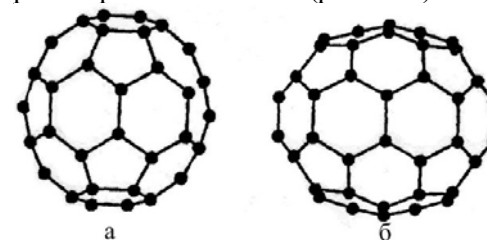


Рис. 6.10. Структура фуллереновых молекул C_{60} (а) и C_{70} (б)

Впоследствии их стали называть фуллеренами в честь американского архитектора Фуллера, получившего в 1954 г. патент на строительные конструкции в виде многогранных сфероидов для перекрытия больших помещений.

Шарообразные (или в форме дыни) молекулы имеют необычную симметрию и уникальные свойства. Сфера образуется шестиугольными структурными формированиями атомов углерода. Все ковалентные связи в этих молекулах насыщены и между собой они могут взаимодействовать только слабыми ван-дер-ваальсовыми силами. При этом последних достаточно для того, чтобы построить из сферических молекул кри-

сталлические структуры (фуллериты). К каждой такой молекуле можно «привить» другие атомы и молекулы (рис. 6.11) и, таким образом, придать ей гидрофильные или гидрофобные свойства. Можно поместить чужеродный атом в центральную полость фуллереновой молекулы как в сверхпрочный контейнер. Раскрыв внутренние связи высоким давлением, интенсивным освещением и т. п., можно соединить две фуллереновые молекулы в димер или полимеризовать исходную структуру мономеров. Кроме того, поместив в водорастворимый фуллерен молекулу газа или другого вещества, можно получить растворы из нерастворимых веществ.

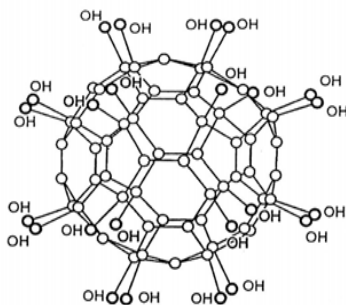


Рис. 6.11. Схема химического строения водорастворимого фуллерена

Впоследствии научились выращивать однослойные и многослойные углеродные нанотрубки (рис. 6.12).



Рис. 6.12. Модели поперечного сечения многослойных нанотрубок: а — «русская матрешка»; б — свисток; в — атомарная структура закрытой с торца однослойной нанотрубки

Они представляют часть сетки с шестиугольной (как у фуллеренов) ячейкой, свернутой в трубку. На рисунке 6.13 приведены изображения нанотрубок.

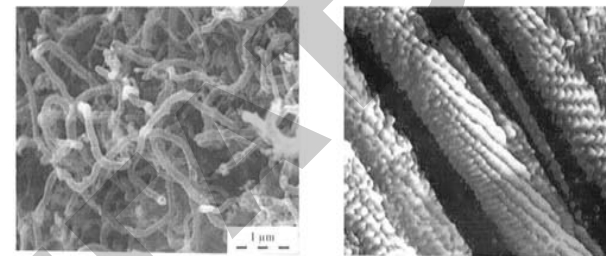


Рис. 6.13. Электронные фотографии нанотрубок

Следует отметить (и это очень важно), что свойствами нанотрубок можно управлять, изменяя их хиральность, т. е. скрученность решетки относительно продольной оси. При этом нанотрубки обладают необычными электрическими свойствами. Так, было установлено, что электроны могут пронеситься по нанотрубке, как по проводнику. Кроме того, было обнаружено, что она может проводить электричество без сопротивления (т. е. являться сверхпроводником); а вводя другие элементы (кроме углерода) можно придать нанотрубке свойства полупроводника. При этом можно получить проволоку нанометрового диаметра, как с металлическим типом проводимости, так и с заданной запрещенной зоной. Соединение двух таких нанотрубок образует диод, а трубка, лежащая на поверхности окисленной кремниевой пластинки, — канал полевого транзистора. Подобные устройства уже созданы и показали свою работоспособность.

Нанотрубки с регулируемым внутренним диаметром являются основой для создания идеальных молекулярных сит высокой селективности и газопроницаемости, контейнеров для хранения газообразного топлива, катализаторов и т. п. Например, для значительного повышения эффективности углеводородного топлива необходимо добиться способности углерода аккумулировать около 6,5 % водорода (по массе). Лабораторные исследования показали, что углеродные нанотрубки обладают высокой аккумулирующей способностью по отношению к газообразному водороду. На их базе можно создать эффективные топливные элементы для транспортных средств или изолированных источников энергии небольших размеров.

Нанотрубки могут использоваться как сенсоры, атомарно острые иголки для сканирующих зондовых инструментов, элементы экранов дисплеев сверхвысокого разрешения и т. д.

Кроме электрических свойств нанотрубки обладают и другими удивительными свойствами (например, предел прочности нанотрубки при растяжении может в 60 раз превышать предел прочности качественной ста-

ли). При этом некоторые ученые считают, что нанотрубку можно растянуть на большое расстояние (от поверхности Земли до стратосферы) и эта трубка выдержит собственный вес.

Нанотрубки становятся тем материалом, который востребован в различных областях человеческой деятельности, но пока удовлетворить спрос на этот материал не представляется возможным (даже крупные производители нанотрубок за неделю изготавливают их в количествах, измеряемых в граммах).

Свойства наноструктур зависят от размера частиц и при переходе к макромасштабу и укрупнению наночастиц уникальные свойства наноструктур меняются. Поэтому разработчики новых наноматериалов используют различные способы изоляции нанобъемов в материале (матричная изоляция, использование пористости и другие приемы).

Классификация строения мезоструктуры наноконструированных материалов приведена на рисунке 6.14.

Хим. состав	Состав и распределение			
	Однофазный	Многофазный		Матричное
		Статическое		
Форма		Идентичные границы	Неидентичные границы	
Пластинчатая				
Столбчатая				
Равноосная				

Рис. 6.14. Классификация по Глейтеру нанокристаллических материалов, учитывающая состав, распределение и форму структурных составляющих

Можно выделить несколько основных областей их применения: высокопрочные конструкционные и функциональные материалы (магнитомягкие и магнитотвердые материалы); нанопористые материалы для химической и нефтехимической промышленности (катализаторы, адсорбенты, молекулярные фильтры и сепараторы); негорючие нанокомпозитные материалы на полимерной основе; топливные элементы; электрические аккумуляторы и другие преобразователи энергии; биосовместимые материалы для трансплантации; лекарственные препараты.

Наиболее крупнотоннажным является производство конструкционных материалов (после строительных), главным образом, металлов и сплавов. Потребность в них и материалоемкость изделия в значительной мере зависят от механических свойств этих материалов (упругости, пластичности, прочности, вязкости разрушения и др.).

Конструкционные материалы, созданные на основе известных ранее наноструктур, обладают уникальными свойствами. У наноструктурированных металлических материалов модуль упругости на 30 % ниже, твердость в 2...7 раз выше, а предел упругости в 1,5...8 раз выше, чем у мелкокристаллических аналогов.

Нанокристаллические порошки имеют огромную удельную поверхность, которая составляет от 20...40 м²/г (при диаметре частиц 100нм) и до 110...120 м²/г (при диаметре 10 нм). Это будет способствовать использованию нанопорошков и материалов из них в качестве катализаторов и адсорбирующих веществ.

Основные методы получения наноструктурированных материалов приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Основные методы получения наноструктурированных материалов

Группа методов	Основные разновидности
Компактирование порошков	Метод Глейтера (газофазное осаждение и компактирование). Прессование и спекание. Электроразрядное спекание
Интенсивная пластическая деформация	Равноканальное угловое прессование. Фазовый наклеп. Деформация кручением в условиях высокого давления
Контролируемая кристаллизация и полимеризация	Обычные и высокие давления, однофазные, многофазные и композитные материалы
Пленочные технологии	Химическое осаждение из газовой фазы (CVD). Физическое осаждение из газовой фазы (PVD). Электроосаждение. Ионно-лучевая имплантация. Термическое разложение

Следует отметить, что прочность материалов определяется химическим составом и характером структуры, под которым понимается наличие определенной кристаллической решетки (или ее отсутствие) и весь спектр дефектов структуры.

Добиваться высоких прочностных показателей можно двумя способами: снижая концентрацию дефектов структуры (приближаясь к идеальному монокристаллическому состоянию) или увеличивая эту концентрацию вплоть до создания мелкодисперсного нанокристаллического или аморфного состояния. Оба способа широко используются в современном физическом материаловедении и производстве.

Большие перспективы имеют нанокompозиты на полимерной основе. В полимерные матрицы можно вводить наночастицы металлов, сплавов, оксидов, карбидов и других веществ в концентрациях до 50 % (по массе). В результате этого они приобретают уникальные электрофизические и магнитные свойства, становятся негорючими и т. д.

Легирование ферромагнитными наночастицами (Fe, Co, Sm и др.) с размерами 2...5 нм позволяет создавать среду — носитель информации с потенциальной плотностью записи в сотни раз выше, чем в лучших существующих магнитных носителях.

Отдельный класс наноструктурированных материалов представляют собой матрицы с нанопорами и каналами, размеры и геометрия которых могут регулироваться средствами нанотехнологии в широких пределах. Такие материалы имеют перспективы широкого использования в качестве катализаторов, фильтров, поглотителей, сепараторов, контейнеров для хранения газообразных продуктов, топлива, лекарств и т. п.

Наноматериалы, часто называют «интеллектуальными». «Интеллектуальные» материалы выполняют статическую или динамическую работу, т. е. или ведут себя одинаково во всех условиях, или активно реагируют на внешние раздражители, меняя свои свойства. Например, если стекла автомобиля изготовить так, чтобы они не смачивались водой, то они не будут замерзать (статический уровень интеллекта). Если же стекла изготовить так, что они изменяют степень прозрачности в зависимости от интенсивности света, то это — пример динамического интеллекта.

В природе почти все биологические структуры являются интеллектуальными.

Человеческая кожа пропускает воду и растворенные ионы, но действует как барьер для воздуха (извне) и биологических жидкостей (изнутри). Кожа является датчиком тепла, звуковых колебаний, прикосновений, кроме того, она самовосстанавливается.

Интеллектуальные материалы могут обладать свойствами самовосстановления, избирательного разделения, распознавания, каталитическими и другими. Они могут быть макрообъемны, но проектируются и создаются эти свойства на наноуровне.

В настоящее время известны десятки (если не сотни) методов создания тонкопленочных структур со средней толщиной от долей микрометров до микрометров. При этом обычно эти методы объединяют в два больших класса: физического осаждения и химического осаждения.

Планарные полупроводниковые технологии (уже ставшие традиционными) позволяют создавать самые разнообразные многослойные тонкопленочные структуры с функциями сенсоров, логической и арифметической обработки сигнала, его хранения и передачи по электронным или оптическим линиям связи. Современные промышленные методы оптической литографии (переноса рисунка электрической схемы на кремниевую подложку) позволяют создавать элементы с размерами около 0,1 мкм. Фактически с помощью этих методов почти достигнут физический предел плотности монтажа, но это обусловлено не столько методом создания необходимой структуры, сколько оптическим способом управления этим процессом.

Следует отметить, что разработаны составы и технологии нанесения сверхтвердых покрытий из нитридов, боридов и карбидов различных металлов толщиной около 1 мкм, уступающих по твердости только монокристаллическому алмазу. Подобные покрытия значительно увеличивают износостойкость режущего инструмента, жаростойкость, коррозионную стойкость изделий, сделанных из сравнительно дешевого основного материала.

С использованием пленочной технологии можно создавать не только сплошные или островковые наноструктуры, но и щетинообразные, с упорядоченным расположением нановорсинок одинаковой толщины и высоты. Эти структуры могут использоваться в качестве сенсоров, элементов экранов высокого разрешения и в других приложениях (рис. 6.15).

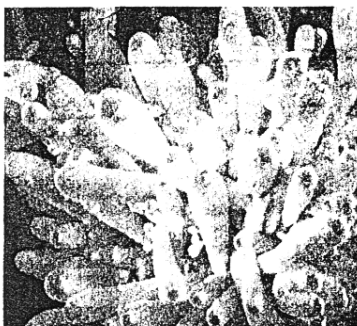


Рис. 6.15. Пучок нанопроволок из SiO_2 (их диаметр составляет несколько нанометров), выращенных на кремневой подложке

Появление полупроводниковой электроники является важнейшим технологическим достижением второй половины XX века. Развитие полупроводниковых технологий, с помощью которых был создан микрочип, а также его применение в средствах связи, вычислительной технике, бытовой электронике и медицине позволили произвести поистине революционные изменения в этих областях.

Так, еще в 50-х годах XX века телевидение было черно-белым, нечетким, телевизоры перед экранами имели линзы, в мире насчитывалось не более десяти компьютеров, а мобильная связь, цифровая электроника, персональные и бортовые компьютеры были представлены только в фантастических произведениях.

Большинство достижений современной цивилизации стали возможны благодаря увеличивающейся надежности и уменьшающейся стоимости полупроводниковой электроники. Объем пространства, необходимый для установки транзистора на чип, сокращается вдвое примерно каждые восемнадцать месяцев, т. е. ячейка, которая когда-то могла вместить 1 транзистор, через пятнадцать лет уже может вместить 1000 транзисторов.

Темпы улучшения всех параметров элементной базы электроники на протяжении последних 30 лет были исключительно высокими. Однако дальнейшее развитие информационных технологий сдерживается рядом ограничений, накладываемых существующими средствами электроники. Для того, чтобы сделать очередной шаг в миниатюризации, освоении новых принципов обработки, хранения передачи данных требуется радикальное увеличение быстродействия, а также интеграции и плотности

размещения отдельных элементов на поверхности и в объеме при одновременном снижении энерговыделения и себестоимости чипа. При этом плотность записи, осуществляемая с применением используемых лазерных технологий, приблизилась к своему физическому пределу. Таким образом, дальнейшее совершенствование технологий уже невозможно эволюционным путем и требуется их революционное изменение. В этой связи любые достижения в нанонауке сначала просматриваются с точки зрения перспективности их использования в информационных технологиях.

Согласно прогнозам большинства специалистов развитие компьютерных и телекоммуникационных технологий в XXI веке будет связано с использованием последних достижений физики квантовых низкоразмерных структур и нанотехнологий изготовления этих структур, их контроля и использования.

К наиболее перспективным из этих технологий относятся электронная литография, электроннолучевое выращивание кристаллов, сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия. Разработка принципиально новых концепций и подходов, явным образом учитывающих атомарную структуру вещества и квантовые закономерности его поведения на таком уровне, становится неизбежной.

Следует отметить, что достижение квантовых пределов ожидается еще не скоро и многие новые принципы и элементы уже опробованы в лабораториях (к примеру, созданы ячейки памяти, размер которых составляет 20 нанометров). Можно предположить, что в ближайшее десятилетие чипы с динамической памятью по количеству транзисторов достигнут числа нейронов в человеческом мозге.

Молекулярная электроника также рассматривается многими специалистами как реальная альтернатива «кремниевой» в недалеком будущем. Тому есть несколько причин. Так, за миллионы лет эволюции в природе возникли разнообразные молекулы, выполняющие все необходимые для сложного организма функции (сенсорные, логически-аналитические, запоминающие, двигательные и т. д.). Возникает закономерный вопрос: зачем разрабатывать и производить искусственные структуры из отдельных атомов кремния, легирующих элементов и т. п. при наличии готовых строительных «блоков»? Тем более, что они имеют оптимальную конфигурацию, структуру и нанометровые размеры.

В конце XX века подобные идеи не получили широкого распространения, поскольку детальной информации о физических, элек-

трических, магнитных и других свойствах крупных молекул было еще мало. В настоящее время существующих фундаментальных знаний и нанотехнологий достаточно лишь для демонстрации принципиальных возможностей создания представителей практически всех классов структур, необходимых для информационных технологий. При этом уже созданы и используются недорогие чипы на органических транзисторах, которые можно использовать как метки для идентификации продуктов, партий товаров и почты.

Нанотехнологии позволяют производить элементы, используемые при создании микроэлектромеханических систем (MEMS). Существуют лабораторные разработки, создающие реальные перспективы практического применения MEMS в микроробототехнике. В этой связи большой интерес представляет создание молекулярных механизмов простейших типов (молекулярные подшипники, шестеренки, валы и зубчатые передачи) (рис. 6.16).

В лабораториях уже созданы все необходимые компоненты для производства микророботов различного назначения. Так, в США существует программа создания «умной пыли» («Smart dust»). Это — большое семейство микророботов, величиной в пылинку, которые смогут, рассыпавшись над территорией противника, проникать во все щели и каналы связи, создавать свою сеть, собирать и передавать оперативную информацию, проводить спецоперации и т. д.

Существуют проекты создания и специальных микророботов-докторов, которые будут сочетать функции диагноста, терапевта и хирурга. Перемещаясь по кровеносной, лимфатической или другим системам человека, эти «доктора» будут заботиться о его самочувствии и здоровье. Уже созданы прототипы таких роботов, имеющих все функциональные узлы, размеры которых составляют около 1 мм.

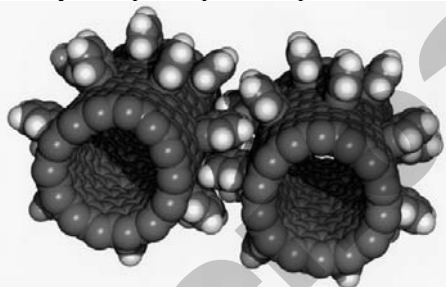


Рис. 6.16. Зубчатая передача из углеродных нанотрубок с зубцами из молекул бензина C_6H_6 .

Наноострия и просто нанопроводники могут быть очень чувствительными и селективными сенсорами, расположенными на одном чипе с электроникой. Если к ним подключить нанонасосы, то в результате этого получится аналитическая химическая лаборатория, размещающаяся на пластине площадью около 1 см^2 . Уже существуют анализаторы боевых отравляющих веществ, биологического оружия, а также «искусственные нос и язык» для аттестации пищевых продуктов (вин, сыров, фруктов, овощей и т. д.).

Огромные перспективы имеют нанотехнологии в области биологии. Это касается как непосредственно человека, так и всего окружающего биологического мира (генная инженерия, белковая инженерия, разработка лекарств с «адресной доставкой» в организме и др.).

В настоящее время в области наноауки и нанотехнологии реализуются десятки крупных программ в развитых странах мира. Нанотехнологии используются в здравоохранении и медицине, биотехнологиях и охране окружающей среды, военном деле и космонавтике, электронике и вычислительной технике, химическом и нефтехимическом производстве, энергетике и транспорте.

Следует отметить, что нанотехнологии входят в категорию приоритетных направлений научно-технической политики всех развитых стран.

По оценкам специалистов в области стратегического планирования и научно-технической политики существующая ситуация по многим признакам напоминает ту, которая сложилась в 70-е годы XX века в преддверии тотальной компьютерной революции, но последствия новой (нанотехнологической) революции будут гораздо значительнее.

Предвидеть все последствия начавшейся нанотехнологической революции пока еще трудно. Однако все эксперты сходятся на том, что эти последствия будут еще масштабнее и глубже, чем от информатизации общества. Умение использовать достижения этой новой науки и соответствующих технологий, способность их развивать станет стратегическим преимуществом соответствующего региона или страны.

Многие исследователи считают, что использование нанотехнологий приведет к следующим переменам в жизни общества:

1. Потребительские и промышленные товары станут более долговечными, качественными, компактными и дешевыми.

2. Медицинское обслуживание будет более доступным и эффективным. Появятся новые лекарственные препараты и диагностические средства. Нанобитехнология сделает жизнь людей более здоровой и продолжительной.

3. Появятся связанные с Интернетом устройства, объединяющие функции телефона, телевизора и компьютера. Возникнет глобальная система связи.

4. Мир вещей станет «интеллектуальным» за счет встраивания чипов во все предметы быта и производства (посуду, бумагу, ткани, инструменты, бытовые приборы и т. п.).

5. Общество станет более свободным и интеллектуальным.

Наноэнергетика сделает мир более чистым в результате разработки новых типов двигателей, топливных элементов и транспортных средств. Сформируется новая экономика, основанная на нанотехнологиях и нанопродуктах. Электронно-информационный бизнес (IT-бизнес) уступит лидирующие позиции NT-бизнесу (нанотехнологическому). Быстрое развитие нанопромышленности потребует коренной перестройки производственных отношений и системы образования на всех уровнях, которая должна будет динамично реагировать на смену производственной парадигмы.

Следует отметить, что развитие нанотехнологий может иметь и отрицательные последствия (например, применение соответствующих разработок в военных целях может привести к непредсказуемым результатам). Поэтому развитие и распространение многих направлений нанонауки и нанотехнологий должно контролироваться международным сообществом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Августик, Л. И.* Керамика / Л. И. Августик. Ленинград, 1975.
2. *Андреевский, Р. А.* Введение в порошковую металлургию / Р. А. Андреевский. Фрунзе, 1988.
3. *Анциферов, Б. Н.* Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Б. Н. Анциферов [и др.]. Москва, 1987.
4. *Арзамасов, Б. Н.* Материаловедение / Б. Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. Москва, 2002.
5. *Верещагин, М. Н.* Получение аморфных сплавов из расплавов / М. Н. Верещагин, А. В. Степаненко. Минск, 2004.
6. *Витязь, П. А.* Пористые порошковые материалы и изделия из них / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, В. К. Шелег. Минск, 1987.
7. *Витязь, П. А.* Формирование структуры и свойств пористых порошковых материалов / П. А. Витязь [и др.]. Москва, 1993.
8. *Власов, С. В.* Основы технологии переработки пластмасс / С. В. Власов [и др.]. Москва, 1995.
9. *Гольдаде, В. А.* Низкомодульные композиционные материалы на основе термопластов / В. А. Гольдаде, А. С. Неверов, Л. С. Пинчук. Минск, 1984.
10. *Джнеладзе, Ж. И.* Порошковая металлургия сталей и сплавов / Ж. И. Джнеладзе [и др.]. Москва, 1978.
11. *Журавлев, В. Н.* Машиностроительные стали / В. Н. Журавлев, О. И. Никонова. Москва, 1981.
12. *Злобин, Г. П.* Формирование изделий из порошков твердых сплавов / Г. П. Злобин. Москва, 1980.
13. *Капцевич, В. М.* Новые материалы и технологии / В. М. Капцевич [и др.]. Минск, 2009.
14. *Кенько, В. М.* Неметаллические материалы и методы их обработки / В. М. Кенько. Минск, 1998.
15. *Клеи и герметики* / под ред. Д.А. Кардашова. Москва, 1978.
16. *Колпашников, А. И.* Армирование цветных металлов и сплавов волокнами / А. И. Колпашников, В. Ф. Мануйлов, Е. В. Ширяев. Москва, 1974.

17. Композиционные материалы: в 8 т. / Под. ред. Л. Браутмана и Р. Крока. Москва, 1978.
18. Композиционные материалы: справочник / Под ред. Д. М. Карпиноса. Киев, 1985.
19. *Кржыжановский, В. К.* Технические свойства полимерных материалов / В. К. Кржыжановский [и др.]. СПб., 2005.
20. *Лабутин, А. Л.* Антикоррозионные и герметизирующие материалы на основе синтетических каучуков / А. Л. Лабутин. Ленинград, 1982.
21. *Лахтин, Ю. М.* Материаловедение / Ю. М. Лахтин, И. П. Леонтьева. Москва, 1990.
22. *Мозберг, Р. К.* Материаловедение / Р. К. Мозберг. Москва, 1991.
23. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / Под ред. М. К. Роко, Р. С. Улиямса, П. Ацивисатоса. Москва, 2002.
24. *Пинчук, Л. С.* Материаловедение и конструкционные материалы / Л. С. Пинчук, В. А. Струк, Н. К. Мышкин, А. И. Свириденко; под ред. В. А. Белого. Минск, 1989.
25. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / Под ред. В. Шатта. Москва, 1983.
26. *Ржевская, С. В.* Материаловедение / С. В. Ржевская. Москва, 2004.
27. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. / Под ред. Дж. Любина. Москва, 1988.
28. *Третьяков, Ю. Д.* Керамика — материал будущего / Ю. Д. Третьяков. Москва, 1987.
29. *Третьяков, Ю. Д.* Химия и технология твердофазных материалов / Ю. Д. Третьяков, Х. Лепис. Москва, 1985.
30. *Фетисов, Г. П.* Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. Москва, 2005.
31. *Шевченко, В. Я.* Техническая керамика / В. Я. Шевченко, С. М. Баринов. Москва, 1993.
32. *Штейнберг, А. С.* Репортаж из мира сплавов / А. С. Штейнберг. Москва, 1989.
33. Энциклопедия полимеров. Москва, 1972.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Калиновский Виктор Рувимович,
Капцевич Вячеслав Михайлович,
Корнеева Валерия Константиновна,
Кривальцевич Дмитрий Иосифович

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Пособие

Ответственный за выпуск *В. М. Капцевич*
Редактор *Н. Н. Акимов*
Компьютерная верстка *А. И. Стебули*

Подписано в печать 26.09.2011 г. Формат 60×84^{1/16}. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,65. Уч.-изд. л. 11,45. Тираж 200 экз. Заказ 826.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.
Пр-т Независимости, 99-2, 220023, Минск.

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ