



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физическое и прикладное материаловедение»

## **УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

по дисциплине

# **«Машиностроительные материалы»**

Авторы

Варавка В.Н.,

Бровер Г.И.,

Дьяченко Л.Д.

Ростов-на-Дону, 2014



## Аннотация

В пособии приведены сведения о структуре, свойствах и применении сталей и сплавов специального назначения (жаростойких, жаропрочных, хладостойких), многих цветных сплавов (алюминиевых, медных, магниевых, никелевых), технической керамики, неметаллических материалов (пластмасс, стекол, резины, древесины, клеящих и лакокрасочных материалов и др.).

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих общие курсы «Материаловедение», «Конструкционные материалы» и специальный курс «Машиностроительные материалы». Учебный материал, изложенный в пособии, может использоваться в процессе выполнения студентами всех специальностей курсовых и дипломных проектов.

## Авторы

д.т.н., доцент Варавка В.Н.,  
д.т.н., профессор Бровер Г.И.,  
к.т.н., доцент Дьяченко Л.Д.





## Оглавление

**Учебное пособие машиностроительные материалы .....4**

Введение .....	4
1. СТАЛИ .....	4
2. ЧУГУНЫ .....	54
3. ТИТАН И ЕГО СПЛАВЫ .....	61
4. ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ И ИХ СПЛАВЫ .....	63
5. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ .....	64
6. АНТИФРИКЦИОННЫЕ СПЛАВЫ, ПРИПОИ, ЛЕГКОПЛАВКИЕ СПЛАВЫ .....	83
7. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ .....	85
8. КЕРАМИЧЕСКИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	132
Контрольные вопросы .....	148
Рекомендуемая литература.....	151

**Методические указания к лабораторному практикуму по курсу «МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ» ..... 152**

Лабораторная работа №1 МИКРОСТРУКТУРА ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ .....	152
Лабораторная работа №2 МИКРОСТРУКТУРА ЧУГУНА ..	165
Лабораторная работа №3 МИКРОСТРУКТУРА ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ .....	178
Лабораторная работа №4 ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПЛАСТМАСС .....	191
Лабораторная работа №5 ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ СТЕКЛА.....	198
Лабораторная работа №6 ИЗУЧЕНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ И ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ.....	204
Лабораторная работа №7 ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ РЕЗИНЫ .....	218



## УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### Введение

Современное материаловедение подразделяет все существующие материалы на четыре основные группы: металлы и сплавы; минералосиликатные материалы; полимерные (синтетические и природные) материалы; композиционные материалы.

Металлы и сплавы являются главным конструкционным материалом, основой всей материальной культуры человечества. Только немногим более 60% в мировом производстве занимают синтетические, композиционные и минералосиликатные материалы. И это не случайно. Почти 3/4 химических элементов, существующих во Вселенной, составляют металлы. Свойства, которыми они обладают, не присущи никакому другому материалу. Они характеризуются прочностью, твердостью, пластичностью, коррозионной стойкостью, высокой электрической проводимостью и многими другими ценными свойствами. Они хорошо обрабатываются литьем и давлением, режутся и свариваются. В технике широко используются магнитные свойства металлов, их способность противостоять агрессивным химическим средствам, выдерживать огромное давление и т.д. Наибольшее распространение в промышленности получили сплавы на основе железа - чугуны и стали. Эти универсальные конструкционные материалы не только обладают высокими качественными показателями, но и имеют относительно небольшую стоимость, поэтому ежегодный выпуск только стали превышает 1 млрд. т.

### 1. СТАЛИ

Сталью называют сплав железа с углеродом (до 2%), поддающийся ковке. В настоящее время нет единой международной классификации сталей. Существует много признаков, по которым классифицируются стали в стандартах и промышленной статистике различных стран. К основным из них относят: способ производства; химический состав; сортамент; качество; структуру в равновесном состоянии или после охлаждения на воздухе; основные свойства; область применения.

1. *По способу производства* разделяют следующие группы сталей:

- *Бессемеровская сталь*. В конверторе жидкий чугун продувается воздухом, кислород которого соединяется с примесями, в том числе с углеродом, и чугун превращается в сталь. Очень



## Физическое и прикладное материаловедение

производительный способ, но остается большое количество серы и фосфора, а металл насыщается газами, особенно азотом.

- *Конверторная сталь* (с продувкой технологически чистым кислородом).

- *Мартеновская сталь.*

- *Электросталь.*

- *Тигельная сталь.*

- *Сталь*, получаемая прямым восстановлением из обогащенной руды (окатышей).

Для повышения чистоты сталей и сплавов и уменьшения анизотропии механических свойств, производят вспомогательную обработку, виды которой иногда дополнительно указывают в конце названий следующими индексами:

ВИ (ВИП) – переплав в вакуумных индукционных печах.

Ш (ЭШП) – электрошлаковый переплав.

ВД (ВДП) – переплав в вакуумных дуговых печах.

ШД – вакуумно-дуговой переплав стали, полученной электрошлаковым переплавом.

ЭЛП – электронно-лучевой переплав.

ПДП – плазменно-дуговая плавка.

ОДП – обычная дуговая плавка.

В зависимости от технологии выплавки различают основную и кислую сталь. По степени раскисленности (связанности кислорода в стали) нелегированную сталь подразделяют на спокойную, кипящую, полуспокойную. *Спокойная сталь* раскисляется марганцем, кремнием и алюминием, *кипящая* – только магнием, *полуспокойная* – магнием и алюминием.

В последние годы в России разработан ряд марок полуспокойной низколегированной стали (08ГФпс, 18ГФпс, 18Г2АФпс и др.)

2. По химическому составу в стандартах России стали подразделяют на нелегированную (углеродистую) и легированную.

Углеродистая сталь кроме углерода, определяющего его механические и технологические свойства, содержит раскисляющие элементы: магний до 12,5%, кремний до 0,30%, алюминий до 0,02% (ГОСТ 380-94), а также переходящие из сырья элементы (медь, хром, никель, сера, фосфор и др.), допустимые массовые доли которых регламентируются стандартами.

В состав легированных сталей кроме углерода и примесей вводят один или несколько легирующих элементов: хром, никель, молибден, ванадий, магний, кремний для обеспечения требуемой



прочности, пластичности, вязкости и других технологических и эксплуатационных свойств. В зависимости от массовой доли введенных легирующих элементов легированную сталь в отечественных стандартах подразделяют на низколегированную (сумма массовой доли легирующих элементов не более 2,5%), среднелегированную (массовая доля легирующих элементов 2,5-10%) и высоколегированную (легирующих элементов более 10%). В зависимости от массовой доли легирующих элементов сталь называют марганцевистой, хромистой, кремнистой, никелевой, хромованадиевой и т.д.

3. По сортаменту и стадии производства различают сырые изделия; жидкую сталь (для разлива в слитки, непрерывного литья заготовок и отливок); твердую сталь (слябы прямоугольного поперечного сечения, ширина которых минимум вдвое больше толщины, слитки различных форм и размеров).

К сырым изделиям относятся: губчатое железо – пористый, губчатый кусковой и сыпучий продукт, получаемый в твердом виде из железной руды при восстановлении оксидов железа посредством введения смеси углекислого газа и водорода. Губчатое железо используют в качестве сырья в электростали и плавильном производстве. Сплавив губчатое железо с ферросплавами, получают высококачественные, легированные стали с минимумом примесей. Губчатое железо используют также в качестве сырья для производства железных порошков в порошковой металлургии.

По размерам поперечного сечения различают следующие виды заготовок: *плоские* (прямоугольного сечения прокат толщиной не менее 50 мм и шириной не менее двух толщин); *листовые* (толщиной более 300 мм и шириной более 150 мм); *квадратные* (бюмы со стороной не более 120 мм); *катаные* или непрерывно - литые со стороной 50-120 мм; *прямоугольные* (бюмы с площадью поперечного сечения более 14400 мм<sup>2</sup> и отношением ширины к толщине 1:2); *катаные* (заготовки с площадью поперечного сечения 2500-14400 мм<sup>2</sup> и отношением ширины к толщине 1:2) и *круглые* диаметром не более 220 мм; *непрерывно литые* (диаметром более 180 мм для прокатки на бесшовные трубы); *сортная сталь* круглого, квадратного, прямоугольного, шести- или восьмигранного поперечного сечения; *фасонный прокат* (уголки, швеллеры, двутавры, широкополочные балки, профили различных креплений и т.д.); *прокат* для железнодорожного транспорта (рельсы, колеса, бандажи, полосы для прокладок и накладок, крепления шпал и др.); *листовой горячекатаный прокат* (тонкий - толщиной менее 4 мм и толстый -



## Физическое и прикладное материаловедение

более 4,0 мм); *горячекатаный, широкополосный универсальный прокат* (толщиной 6-60 мм и шириной 200-600 мм); горячекатаный полосовой *прокат периодического профиля*; холоднокатаный *листовой прокат* (толщиной  $\delta < 4,0$  мм, толстый  $\delta > 4,0$  мм); *изделия и катаные стали*: листы с «облагороженной» поверхностью и полосы (ленты) с металлическим покрытием из олова (белая жечь), сплавов свинца, олова, цинка, алюминия и др., а также органическими или неорганическими покрытиями; *двух и трехслойные листы и полосы*, плакированные коррозионно-стойкими износостойкими сталями и сплавами; *гнуемые профили* (включая замкнутые сварные), листовая и ленточная электротехническая сталь; *особо тонкие холоднокатаные листы и ленты*; *стальные трубы, метизы* и др.

Классификацию по сортаменту и стадиям производства используют в основном в промышленной статистике, а также при осуществлении торговых и таможенных операций.

4. *По качеству* стали подразделяют на стали обыкновенного качества, качественную, высококачественную и особовысококачественную. Категорию обыкновенного качества устанавливают только для углеродистой стали. Сталь всегда содержит примеси, в том числе такие вредные, как сера и фосфор, которые не поддаются полному удалению, а также в малых количествах кислород, азот, углерод. Наряду с ограничением предельных массовых долей вредных примесей (фосфора и сера) для металлопродукции из качественной, высококачественной и особовысококачественной сталей в стандартах устанавливаются, как правило, и более жесткие требования к другим показателям качества (содержание неметаллических включений, газов, размеры поверхностных и объемных дефектов, структура и другие).

Допустимые предельные массовые доли,		фосфор	сера
%			
Сталь	обыкновенного качества.....	0,040	0,050
Качественная	сталь.....	0,035	0,035
Высококачественная	сталь.....	0,025	0,025
Особовысококачественная	сталь.....	0,025	0,015

5. *По структуре в равновесном состоянии (т.е. после отжига)* стали подразделяют на доэвтектоидные, эвтектоидные, заэв-



## Физическое и прикладное материаловедение

тектоидные, ледебуритные (в которых первичные карбиды выделяются из жидкой фазы при кристаллизации).

Другим структурным признаком, по которому классифицируются стали, является структура, полученная при охлаждении на воздухе образцов небольших сечений после высокотемпературного нагрева (900°C). Стали подразделяют на перлитную, бейнитную, мартенситную, ледебуритную, ферритную и аустенитную. Перлитная и бейнитная структуры чаще всего формируются в углеродистой и низколегированной сталях, мартенситная в средне- и высоколегированной, а ферритная и аустенитная в высоколегированной стали.

Ледебуритные стали, как правило, являются разновидностью мартенситных сталей с высоким содержанием углерода и легирующих элементов. После нормализации структура стали представляет смесь мартенсита и ледебурита, наличие которого является причиной карбидной ликвации в поковках и прокате.

6. *По основным свойствам* стали классифицируют, чтобы определить эксплуатационные свойства, в наиболее полной мере отвечающие требованиям потребителей. Такую классификацию используют в стандартах большинства технически развитых стран.

В качестве основных свойств стали используют прочность в состоянии поставки при температуре 20°C, повышенных или отрицательных температурах; сопротивление хрупкому разрушению; деформируемость или способность к холодному деформированию (в том числе волочением); восприимчивость к термической обработке (цементации, улучшению и т.д.); свариваемость, характеризующую углеродным эквивалентом; обрабатываемость резанием (например, для автоматных сталей); стойкость к химической или атмосферной коррозии; физические свойства.

7. *Классификация сталей по назначению.* Применяемые в машиностроении стали по основным эксплуатационным свойствам подразделяются на три класса: конструкционные, инструментальные и с особыми физическими свойствами, далее классы подразделяются на подклассы, подклассы на группы, и, наконец, группы – на подгруппы. Это можно представить в виде следующей иерархической схемы (рис.1).



*Стали общего назначения*, к которым относятся углеродистые стали обыкновенного качества и качественные, их показатели в горячекатаном или термически обработанном (нормализованном) прокате регламентируются в следующих пределах:  $\sigma_B \leq 680$  МПа,  $\sigma_{0,2} \leq 285$  МПа,  $\delta \leq 20\%$ ,  $K_{CH} \leq 49$  Дж/см<sup>2</sup> (при 20°C),  $K_{CH} \leq 29$  Дж/см<sup>2</sup> (при 0°C), после механического старения  $K_{CH} \leq 29$  Дж/см<sup>2</sup>. Перечень нормируемых показателей и их допустимые значения устанавливаются в стандартах (ГОСТ 16523-97, 14637-89).

*Конструкционные стали* (углеродистая, низколегированная и среднелегированная) применяют для изготовления деталей машин, механизмов и конструкций в машиностроении; они имеют определенные значения показателей прочности, пластичности, вязкости, т.е. конструктивной прочности. Эти стали, как правило, подвергаются термической обработке и поэтому подразделяются на цементуемые, улучшаемые и рессорно-пружинные. Конструкционные стали также классифицируются по более узкому назначению – сталь подшипниковая, сталь для холодного выдавливания и высадки и др.

Близкие по химическому составу к конструкционным сталям углеродистые и низколегированные стали, не предназначенные для термообработки у потребителя, объединяют в группу строительных сталей, которые применяют в основном для изготовления сварных металлических конструкций.

***Инструментальные стали* используются для изготовления измерительного, режущего, штампового и других инструментов. Они обычно разделяются на пять групп: углеродистые; низколегированные; среднелегированные и высоколегированные для штампов холодного деформирования; среднелегированные для штампов горячего деформирования; быстрорежущие.**

*Стали с особыми свойствами* – это стали, которые наряду с определенными значениями показателей механических свойств при температуре окружающей среды имеют резко выраженное физическое или физико-химическое свойство: коррозионностойкость, жаропрочность, теплоустойчивость, износостойкость, с особыми магнитными или электрическими свойствами и т.д.

**Маркировка сталей в национальных стандартах.** Системы маркировки сталей и сплавов национальных стандартов в обозначениях марок отражают общие признаки, характеризующие материал: химический состав, механические свойства, пока-



затели качества, способ производства. Однако совокупность этих признаков в обозначениях марок сталей в различных странах неодинакова. Это обусловлено тем, что, во-первых, обозначения учитывают не все указанные признаки, а, во-вторых, практически в каждой стране в обозначения часто вводят буквы и цифры, имеющие собственный смысл, например, аббревиатуры или полные названия разработавших их фирм, инициалы авторов, индексы технологических процессов, применявшихся при их обработке и т.д.

Все это затрудняет сопоставление различных марок сталей и требует составление специальных банков данных по их аналогам.

Тем не менее, можно выделить семь компонентов, с помощью которых обозначаются марки сталей: **условные обозначения**, применяемые в стране для каждого класса сталей или способа получения стали; **среднее содержание углерода**; химические **символы** легирующих элементов; **цифры**, указывающие содержание элементов стали; **буквы**, указывающие на качество стали (в том числе содержание фосфора и серы); обозначение **вида сортамента**; **обозначение принадлежности** марки стали к стандарту. В обозначение, естественно, входит только часть этих компонентов. Вместо второго и третьего могут быть указаны гарантированные  $\sigma_B$  или  $\sigma_{0,2}$ .

Наряду с национальными существуют международные (страны СНГ) и европейские стандарты (Евронормы). В основу международных положены стандарты России, в Евроноормах - маркировка имеет свои особенности.

**Маркировка сталей в России.** Принята буквенно-цифровая система обозначения марок сталей. В обозначение марки углеродистой конструкционной стали обыкновенного качества входят: Ст (сталь), цифра, обозначающая условный номер в зависимости от химического состава, и буквы, определяющие степень раскисления (кп - кипящая, пс - полуспокойная, сп - спокойная). Например: Ст1кп, Ст2пс, Ст3сп.

При увеличении номера от 1 до 6 в стали возрастает содержание углерода от 0,06 до 0,49%. Введена также система маркировки краской для удобства складирования: Ст0-красная, зеленая, Ст1 - желтая, черная, Ст2 - желтая, Ст3 - красная, Ст3Гпс - красная, коричневая, Ст3Гсп - зеленая, Ст6-синяя.

*Углеродистые конструкционные качественные стали* обозначаются числом, указывающим среднюю массовую долю углерода в сотых долях процента (например, сталь10, сталь30).



## Физическое и прикладное материаловедение

Для сталей, полностью не раскисленных, в обозначение добавляются буквы кп или пс (сталь15кп, сталь20пс), для спокойной стали буквы не добавляются.

В обозначение углеродистой инструментальной стали входят: буква У и цифра, указывающая среднюю массовую долю углерода в десятых долях процента (У10, У12).

В легированных сталях основные легирующие элементы обозначаются следующими буквами: А - азот, Б - ниобий, В - вольфрам, Г - марганец, Д - медь, Е - селен, К - кобальт, Б - бериллий, М - молибден, Н - никель, П - фосфор, Р - бор, С - кремний, Т - титан, Х - хром, Ц - цирконий, Ч - редкоземельные металлы, Ф - ванадий, Ю - алюминий. Цифры, стоящие после буквы в обозначении марки, показывают примерно массовую долю элемента, округленную до целого числа. При средней массовой доле легирующих элементов до 1,5% цифру за буквой не обозначают. Массовая доля углерода указывается в начале марки: в сотых у конструкционных сталей и десятых долях процента у инструментальных сталей. Так, конструкционную сталь, содержащую (%)  $C=0,42-0,50$ ,  $Mn=0,5-0,8$ ,  $Cr=0,8-1,0$ ,  $Ni=1,3-1,8$ ,  $Mo=0,2-0,3$ ,  $V=0,1-0,18$ , обозначают 45ХН2МФ. Инструментальную сталь для штампов горячего деформирования, содержащую (%)  $C=0,32-1,40$ ,  $Mn=0,15-0,40$ ,  $Cr=4,5-5,5$ ;  $Mo=2,10-1,50$ ;  $V=0,3-0,5$ ;  $Si=0,9-1,2$ , обозначают 4Х5МФС. Если в инструментальной легированной стали углерода больше 1,0%, цифра в начале марки не ставится (Х, ХВГ).

В обозначение марки подшипниковой стали входят: буква Ш и другие, обозначающие легирующие элементы. За буквой Х (хром) указывают цифры, соответствующие массовой доле хрома в десятых долях процента (ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ). Буква А в конце марки любой стали указывает, что сталь относится к категории высококачественной (30ХГСА), в середине обозначения марки - легирована азотом (16Г2АФ), в начале марки - сталь автоматная повышенной обрабатываемости резанием (А35Г2). Буквы АС в начале марки указывают, что сталь автоматная со свинцом (АС35Г2).

Особовысококачественную сталь обозначают, добавляя через дефис в конце марки букву Ш (электрошлаковый переплав) или другие буквы, о которых говорили раньше (30ХГС-Ш), или ШХ15-ШД - электрошлаковый вакуумно-дуговой переплав для прецизионных подшипников.

Стали, не содержащие в конце маркировки буквы А, Ш или другие буквы, относятся к категории качественных (30ХГТ,



У8).

В конце марки конструкционной стали могут быть дополнительные обозначения: ПП – пониженной прокаливаемости, Л – литейная, К – сталь для котлов и т.д.

Строительную сталь обозначают буквой С и цифрами, условно соответствующими пределу текучести проката. Буква К в конце марки – повышенная коррозионная стойкость в атмосфере, а буква Т – термоупрочненный прокат (С245, С345Т, С390К).

В обозначение быстрорежущей стали входят: буква Р, цифра, указывающая среднюю массовую долю вольфрама в процентах. Во всех быстрорежущих сталях массовая доля Cr  $\approx$  4%, поэтому в обозначении марки букву Х не указывают. Ванадий, массовая доля которого колеблется от 1 до 5%, обозначается буквой Ф, если его средняя массовая доля больше 2,5%, например, Р9М4К8 содержит в %: С=1,0-1,1; Cr=3,0-3,6; W=8,5-9,6; V=2,1-2,5; Mo=3,8-4,3; Co=7,5-8,5.

**Маркировка сталей за рубежом.** Особенности маркировки сталей по Евронормам определяются тем, какие признаки из рассмотренных вводятся в обозначения.

Если в маркировку вводят механические свойства (без термической обработки или после нормализации), то в начале обозначения ставится символ железа Fe. Затем идет цифровое значение минимально гарантированного  $\sigma_B$ . Если же после Fe стоит буква E, то цифры после нее обозначают  $\sigma_{0,2}$  (в МПа). Далее следует химический символ легирующего элемента или показателя качества (через дефис). Затем идет буква, характеризующая ограничения по содержанию серы и фосфора, а в конце марки – обозначение по Евронормам (EU). Например, FeE360CrEU – сталь с гарантированным  $\sigma_{0,2} = 360$  МПа, легированная Cr, обозначение по Евронормам.

Степень чистоты стали определяется пятнадцатью уровнями Y, V, U, T, R, Q, N, M, L, K, J, H, G, F, Z в направлении уменьшения содержания фосфора с 0,08 до 0,015% и серы от 0,06 до 0,02%. Например, Fe420N – сталь с гарантированным  $\sigma_B = 420$  МПа, содержанием серы и фосфора не менее 0,04%. Если же основой маркировки объявляется химический состав, то в углеродистых сталях вначале ставится символ углерода С, а затем его содержание, потом могут быть буквы, указывающие содержание серы и фосфора, а в конце – обозначения по Евронормам.

*Примеры:* С35 – углеродистая сталь со средним содержанием углерода 0,35%, С40К – 0,4% углерода, серы и фосфора



$\approx 0,035\%$ ,

C42EU- 0,42% углерода с обо-

значением по Евронормам.

В легированных сталях система построения маркировки такая же, как указано выше, с одним отличием: если содержание каждого легирующего элемента превышает 5%, то в обозначение добавляют в начале букву X. Например, X10CrNi1808 – хромоникелевая сталь с C=0,1%, Cr=17-19%, Ni=7-9%.

## 1.1. Конструкционные стали

### 1.1.1. Стали конструкционные углеродистые

В эту группу включаются стали обыкновенного качества и качественные. Они имеют удовлетворительные механические свойства в сочетании с хорошей обрабатываемостью резанием.

**Стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-94).** Изготавливаются бессемеровским способом. Стали этой подгруппы применяются в основном для изготовления элементов несущих конструкций (как сварных, так и несварных) и неотчетственных деталей: болты, гайки, ручки, втулки, цапфы, фланцы, оси, а также детали, изготавливаемые глубокой вытяжкой.

В стали Ст0 ограничивают только содержание углерода (не более 0,23%). К количеству серы и фосфора, а также к технологии выплавки не предъявляется никаких требований.

В зависимости от технологии раскисления стали выпускаются трех разновидностей: кипящие с содержанием углерода меньше 0,27% (Ст1кп, Ст2кп, Ст3кп, Ст4кп); полуспокойные (Ст1пс, Ст2пс, Ст3пс....Ст6пс); спокойные (Ст1сп ....Ст6сп).

К этому же подклассу относятся стали с повышенным содержанием марганца (0,8-1,1%), которые имеют повышенную прочность в сравнении с чисто углеродистыми (Ст3Гпс, Ст4Гпс, Ст5Гпс.).

В зависимости от назначения и нормируемых показателей углеродистые стали обыкновенного качества подразделяются на три группы (А, Б, В) и 6 категорий.

*Сталь группы А* поставляется с гарантированными механическими свойствами в отожженном состоянии для использования без горячей обработки (регламентируются  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{изг}$ ,  $\delta$ , правда, у 1-й категории сталей только,  $\sigma_B$  и  $\delta$ , у 2 -  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{изг}$ ,  $\delta$ , а у остальных групп сталей – все свойства.)



*Сталь группы Б* поставляется с гарантированным составом для изготовления деталей с применением горячей обработки (ковки, сварки или термообработки). Стали 1-й категории проверяются на С, Mn, Si, S, P, мышьяк (As), остальные – еще и на Cr, Ni, Cu.

*Сталь группы В* поставляется с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Применяются для сварных и других конструкций, где важно знать химический состав и свойства.

***Стали углеродистые качественные (ГОСТ 1050-88).***

Изготавливаются в конверторах с продувкой кислородом, в мартеновских и электрических печах. Эти стали подразделяются на следующие группы:

- низкоуглеродистые (до 0,2%С) малопрочные и высокопрочные стали, которые применяются для деталей, изготавливаемых холодной штамповкой и высадкой. Без термообработки в горячекатаном состоянии из них изготавливают шайбы, прокладки, патрубки, муфты, крюки, болты и др.

- низкоуглеродистые (до 0,3%С) цементуемые для изготовления деталей с высокой поверхностной твердостью: малонагруженные шестерни, червяки, кулачки, толкатели. В горячекатаном и нормализованном состоянии они применяются для деталей невысокой прочности: крепежные детали, втулки, оси, валы, муфты, штуцеры и многочисленные детали котлотурбостроения (трубы, змеевики и т.д.).

- среднеуглеродистые (0,35-0,60%С). В улучшенном состоянии или с поверхностным упрочнением ТВЧ из них изготавливают коленчатые валы малооборотных двигателей, шатуны, зубчатые колеса маховиков, оси, шпиндели и т.д.

- стали высокоуглеродистые (до 0,85%С), в том числе с повышенным содержанием Mn, применяются в основном для ресор и пружин.

Типичными марками сталей этой подгруппы являются: стали 08,10,15,20,25,30,40, 45,50,55,60,65,70,75,80,85,60Г,65Г,70Г.

Кипящие стали выпускаются следующих марок: 08кп, 10кп, 11кп,18кп, 20кп; полуспокойные - 08пс, 10пс, 15пс,20пс. Остальные стали, как правило спокойные, маркируются без индекса (сталь45, сталь65).

Особенностями химического состава качественных углеродистых сталей являются небольшой интервал допустимого содержания углерода и нормированное содержание Cr (0,1-0,25%).



## Физическое и прикладное материаловедение

Маркировка конструкционных углеродистых сталей за рубежом. **В Германии стали обыкновенного качества поставляются по национальным стандартам DIN (Deutsche Industrienorm) 17100, 17102, 1623/1, 1523/2, другие качественные по 1629/3, 2393/2, 17200, 17210.**

Маркировка сталей обыкновенного качества осуществляется двумя способами: с помощью цифр, обозначающих номер группы сталей, или с помощью цифр и букв, обозначающих марку стали.

В первом случае используется двухзначный номер для обозначения группы сталей. При этом первая цифра, характеризующая способ производства, и вторая, характеризующая вид обработки, могут меняться от 0 до 9. Например: St51 – сталь мартеновская кипящая (первая цифра 5), нормализованная после прокатки (вторая цифра 1), а если St55, то также мартеновская, но после улучшения.

Второй способ предусматривает в начале марки ставить заглавную букву, характеризующую способ раскисления стали (U – кипящая, R – спокойная, RR – сталь, успокоенная по специальным технологиям), затем следуют буквы St, далее число, характеризующее  $\sigma_B$ , двухзначное (МПа/10) или трехзначное (МПа) и число, указывающее номер группы качества.

Кроме того, могут быть указаны способ выплавки (E – в электропечах, M – в мартенах, Y – с продувкой кислородом) и способ обработки (например, Z – волочение, P – ковка или штамповка, U – прокатка, N – нормализация). Например, MRSt420-2N – углеродистая сталь мартеновского производства, спокойная, с гарантированным  $\sigma_B=420$  МПа, второй группы качества, нормализованная.

Приведем маркировку аналогов углеродистых конструкционных сталей обыкновенного качества общего назначения в России и Германии:

Россия	Ст0	Ст2пс	Ст3 пс	Ст4пс
Германия	St33	U St 34-2	R St 37-2	St 44-2

В США стали обыкновенного качества поставляют по национальным стандартам ASTM (American Society for Testing and Materials). В начале марки указывают стандарт (буква A), затем трехзначное число – номер стандарта, и, наконец, через косую черту – заглавные буквы (A, B, C, D) (Grade A, B, C, D) или двухзначные цифры, характеризующие марку сталей.

Аналоги:

Россия	Ст2 кп	Ст3сп	Ст4 сп	Ст3Гпс
--------	--------	-------	--------	--------



## Физическое и прикладное материаловедение

США                    A 283/A            A 283/C            A131/A            A572/42

Во Франции стали обыкновенного качества поставляют либо без термообработки, либо после отжига или нормализации по стандартам NF (Norme – Francaise). Различают две группы сталей. К первой группе относят марки с  $\sigma_B=350-500$  МПа, предназначенные для изготовления сложных профилей (двутавры, швеллеры) и уголков. Их обозначают по схеме ADx, т.е. двумя заглавными буквами (A и D) и однозначным числом, указывающим порядковый номер в группе.

У второй группы сталей в обозначение вводят гарантированные  $\sigma_B$  (МПа) и через дефис – один из четырех показателей качества (1, 2, 3, 4). В основу показателя качества заложены значения  $\sigma_B$  и  $\delta$ , а сам показатель рассчитывается по формуле:  $N=0,1\sigma_B+2,5\delta$ , где  $\sigma_B$  – временное сопротивление разрыву, МПа;  $\delta$  – относительное удлинение, %. Минимальное значение показателя качества – 1 составляет 94-98; 2 – 106-110; 3 – 112-116; 4 – 116-121. В начале обозначения марки ставят букву А. Например, А330 ( $\sigma_B \geq 330$  МПа).

Аналоги сталей:

Россия	Ст0	Ст3кп	Ст4кп
Франция	ADx	A 370-1	A420-3

В Японии стали углеродистые обыкновенного качества поставляют по стандартам JIS (Japanese Industrial Standard), например: 63101, 63106. Сталь маркируют буквами SS и тремя цифрами, обозначающими  $\sigma_B$  в МПа.

Аналоги сталей:

Россия	Ст2пс	Ст4пс	Ст5пс
Япония	SS 340	SS 410	SS 500

В обозначениях марок качественных конструкционных углеродистых сталей в национальных стандартах многих странах мира в виде двухзначного числа указывают содержание углерода в сотых долях процента, умноженное на 100.

В России стали поставляют по ГОСТ 1050-88. В обозначении марки указывают в виде двухзначного числа содержание углерода, умноженное на 100.

В Германии стали поставляют по DIN 1629/3, 2393/2, 17200, 17210 и др. В обозначении марки вначале указывается буква С (если сталь не подвергается улучшению) или буквы Сk (если сталь подвергается термическому улучшению), а затем – в виде двухзначного числа содержание углерода, умноженное на 100. Например, C45 – качественная углеродистая сталь, содержащая в среднем C=0,45%, Сk45 – качественная углеродистая улучшенная



сталь с  $C=0,45\%$ .

В США стали поставляют по ASTM, A29/A29M, A512, A519 и др. Маркируют четырехзначным числом: первые две цифры (10) указывают на принадлежность стали к классу конструкционной углеродистой качественной (1 - углеродистая, 0 – номер марки в этой группе, соответствующий различным группам углеродистой стали, например, 11 – автоматная), вторые две – среднее содержание углерода, умноженное на 100. Например, сталь 1010 является углеродистой качественной, содержащей C в среднем 0,10% (0,08-0,13%).

Во Франции стали с нормальным содержанием углерода и серы обозначают одной или двумя буквами C (CC), за которыми ставят цифры, соответствующие количеству углерода (%), умноженному на 100. Например, C10 или CC28 – стали, содержащие в среднем 0,10 и 0,28% углерода. Если же содержание углерода, серы и фосфора ограничено предельным значением, то вначале ставится буква X, например, XC42.

В Японии стали обозначают буквами S и C, между которыми ставят две цифры, указывающие содержание углерода, умноженное на 100. Например, S15C – углеродистая качественная сталь, содержащая в среднем 0,15% углерода.

Например, углеродистая качественная сталь, содержащая в среднем  $C=0,45\%$ , в России обозначается цифрами 45; в Германии C45 или Sk45; во Франции – C45 или CC45; в Японии – S45C; в США – 1045; по Евронормам – C45UN.

#### 1.1.2. Стали конструкционные легированные

Стали с относительно малым (до 0,2%) содержанием углерода и массовой долей легирующих элементов, не превышающей 2-3%, называются конструкционными низколегированными (ГОСТ 5520-79). Низколегированные стали применяют как без термообработки, так и в термообработанном состоянии, в том числе с карбонитридным упрочнением. По сравнению с аналогичными по содержанию углерода углеродистыми сталями обычного качества они имеют более высокую прочность из-за упрочняющего влияния на феррит Si, Mn, Cr, и др.

Основное применение стали находят в судостроении, транспортном и химическом машиностроении, из них изготавливают металлоконструкции, в том числе и в северном исполнении, мосты, трубопроводы, вагоны и т.д. К этой группе сталей относят стали 14Г, 18Г2, 10Г2С21, 10ХСНД и др. Стали хорошо свариваются, имеют повышенную вязкость и коррозионную стойкость.



## Физическое и прикладное материаловедение

В соответствии с ГОСТ 4543-71 конструкционные легированные стали, содержащие более 3% легирующих элементов, подразделяются на стали нормальной, повышенной прочности и высокопрочные легированные стали. При этом положительные особенности этого класса сталей проявляются, главным образом, в термообработанном состоянии. К ним можно отнести следующее:

Стали обладают более высоким сопротивлением пластической деформации ( $\sigma_{0,2}$ ) по сравнению с углеродистыми.

Легирующие элементы стабилизируют аустенит, что повышает прокаливаемость сталей, а для закалки позволяет использовать охладители с меньшим коэффициентом теплоотдачи (масло) и снижать остаточные напряжения и коробление.

Стали имеют повышенную вязкость и сопротивление хладноломкости, особенно после легирования Ni, что увеличивает эксплуатационную надежность машин.

Легированные стали нормальной и повышенной прочности. Эти стали могут быть низкоуглеродистыми (до 0,3%) и среднеуглеродистыми (от 0,3 до 0,5%). Первые из них относятся к цементуемым, а вторые к улучшаемым.

Цементуемые стали (ГОСТ 4543-71). В механизмах передачи и распределения энергии зубчатые колеса, кулачки и другие детали подвергаются многократному циклическому воздействию переменных нагрузок. Рабочие участки деталей, находящиеся в контакте с другими деталями, воспринимают и передают значительные усилия и поэтому должны иметь высокую прочность и стойкость по отношению к контактной усталости. Кроме этого, эти участки должны обладать запасом вязкости.

Для получения необходимого комплекса свойств используют химико-термическую обработку (цементацию, нитроцементацию). При этом упрочненный слой имеет толщину не менее 0,5-0,6 мм (суммарная толщина заэвтектоидной, эвтектоидной и переходной зон.). После закалки и низкого отпуска на внутренней границе упрочненного слоя твердость составляет 50HRC, а на поверхности детали – 58-63HRC. Оптимальная структура упрочненного слоя – мартенситная матрица с содержанием в ней карбидов, повышающих износостойкость, и остаточный аустенит (10-15%), который ускоряет приработку, например, зубчатых пар. Наиболее типичными цементуемыми сталями являются 20X, 20XГР, 20XM, 15XГН2ТР.

Отдельную группу образуют теплопрочные комплексно-легированные цементуемые стали, которые сохраняют высокую



## Физическое и прикладное материаловедение

твердость и прочность при температурах больше 2000С благодаря повышенному содержанию хрома и легированию молибденом, ванадием, вольфрамом. Примеры сталей: 14ХГСН2МА, 12Х2НВФМА, 20ХЗМВФА. Такие стали используют для тяжело нагруженных шестерен летательных аппаратов.

Особенностью цементации этого класса цементуемых сталей является насыщение поверхностного слоя до 1,2-1,6% С. Это приводит к увеличению количества карбидов и, как следствие, к повышению износостойкости и предела контактной выносливости рабочего слоя.

Улучшаемые стали (ГОСТ 4543-71). Из них изготавливаются детали, подвергающиеся статическим, циклическим и ударным нагрузкам: коленчатые валы, шатуны, штоки, валы, роторы турбин, тяжело нагруженные детали компрессоров и редукторов.

Улучшаемые стали представляют собой группу легированных сталей с содержанием С=0,3-0,5%. Оптимальные свойства эти стали приобретают после закалки и высокого отпуска при 500-6000 С на структуру сорбит отпуска. Такая структура по сравнению с нормализованным состоянием обеспечивает повышение  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{-1}$ , сопротивления распространению трещин и снижение температуры полухрупкости (Т50).

Вместе с тем у среднеуглеродистых сталей с прочностью  $\sigma_B$  большей или равной 1300 МПа из-за низкой пластичности повышается их чувствительность к надрезам в напряженных зонах. В результате в местах концентрации напряжений зарождаются усталостные трещины, которые быстро выводят изделия из строя. Для предотвращения влияния концентраторов используют дополнительное упрочнение поверхности деталей либо поверхностным пластическим деформированием (ППД), либо индукционной закалкой, либо азотированием. Такая обработка создает в поверхностных слоях сжимающие напряжения, которые уменьшают уровень растягивающих напряжений от внешних нагрузок, а с другой стороны, упрочнение приводит к затруднению микропластических деформаций поверхностных слоев, приводящих к зарождению усталостных трещин.

В зависимости от химического состава улучшаемые стали подразделяются на хромистые (30Х, 35Х, 38ХА, 40ХА, 50ХА), марганцовистые (30Г2, 50Г2), хромомарганцевые (40ХГТР), хромокремнистые (38ХС, 40ХС).

Очень важным показателем улучшаемых сталей является прокаливаемость. Так, у сталей 40ХНМ и 38ХНЗМА она достигает 100 мм, что позволяет использовать эти стали для изготовления



очень широкой номенклатуры деталей.

Стали легированные высокой прочностью. Высокопрочное состояние, при достаточном сопротивлении хрупкому разрушению, обеспечивается в среднеуглеродистых комплексно-легированных высоко - или особовысококачественных сталях после закалки, низкого отпуска и термомеханической обработки, а также в мартенситно-стареющих и метастабильных аустенитных сталях.

К первым из них (среднеуглеродистым, комплексно-легированным) относятся, например, хромансиль (30XГН2А, 30X2ГСН2ВМ) при обязательном обеспечении повышенного металлургического качества и получении мелкозернистого состояния. С этой целью в них вводят никель и карбидообразующие элементы, которые тормозят процессы разупрочнения при отпуске, что, в свою очередь, позволяет повысить его температуру, увеличив вязкость без потери  $\sigma_B$ .

В настоящее время в качестве высокопрочных сталей используют мартенситно-стареющие стали, относящиеся к сталям интерметаллидного упрочнения. Обычно в их состав входит 17-25% никеля, 8-12% кобальта, до 1,5% титана, а также молибдена, алюминия, углерода меньше 0,03%, чтобы не образовались карбиды (например, H18K8M5T, H18K12M5TЮ). Наличие никеля и титана необходимо для образования интерметаллидных фаз типа NiTi или Ni3 Ti, выделяющихся при старении сталей. Ввиду высокого содержания легирующих элементов и практически отсутствующего углерода закалку можно проводить с любой скоростью.

Полученный после закалки мартенсит обладает высокой прочностью, но большой пластичностью. Поэтому в таком закаленном состоянии сталь подвергают обработке давлением, резанием и т.д. Окончательные прочностные свойства сталей формируются при старении (480-5000С).

Мартенситно-стареющие стали очень дорогие, но несмотря на это их применяют для наиболее ответственных деталей авиационно-космической техники, в ракетостроении, судостроении, где требуются высокие удельные характеристики и эксплуатационная надежность.

Еще одним классом высокопрочных сталей являются ТРИП-стали или ПНП – стали (пластичность, наведенная превращением), относящиеся к метастабильным аустенитным сталям. Высокая прочность, пластичность и вязкость в них достигается получением после закалки с нагревом до 1000-11000С метаста-



## Физическое и прикладное материаловедение

бильного аустенита. Причем химический состав должен обеспечивать понижение МН ниже комнатной температуры, при этом МД должна быть выше комнатной (МД - температура, выше которой деформация не вызывает мартенситного превращения). Структурное окончательное состояние достигается за счет деформации при температуре ниже МН, в процессе которой аустенит переходит в высокопрочное мартенситное состояние. Типичная трип сталь - 30Х9Р8М4Г2С2.

### 1.1.3. Стали с повышенными технологическими свойствами

Под технологическими свойствами понимается обрабатываемость резанием, штампуемость, свариваемость, литейность (пригодность к изготовлению деталей литьем).

Стали с улучшенной обрабатываемостью резанием (автоматные стали ГОСТ 1414-75). Обрабатываемость резанием оценивается в основном интенсивностью изнашивания инструмента. Она зависит от механических свойств, микроструктуры, химического состава и теплопроводности. Повышение обрабатываемости обеспечивается технологическими (термическая обработка и наклеп) и металлургическими приемами.

Повышению обрабатываемости резанием среднеуглеродистых сталей способствует нормализация, поскольку после нее формируется наилучшая для резания структура: феррит и пластинчатый перлит. Причем нормализация в этом случае проводится с высоких температур для получения крупного зерна, что также улучшает обрабатываемость из-за пониженной вязкости крупнозернистых структур. Повышение обрабатываемости низкоуглеродистых сталей достигается наклепом, который способствует получению ломкой стружки.

Стали эвтектоидного и заэвтектоидного состава лучше обрабатываются резанием, если их структура представляет собой зернистый перлит. Поэтому они перед резанием подвергаются изотермическому или маятниковому отжигу на зернистый перлит.

Однако наибольший эффект в повышении обрабатываемости достигается металлургическим путем (изменением состава). Для этой цели разработана группа автоматных низкоуглеродистых сталей, содержащих от 0,07 процента углерода у стали А22 до 0,45 процента углерода у стали А40 со специально вводимыми присадками серы, свинца, кальция, фосфора, селена.

По химическому составу автоматные стали разделяют на



## Физическое и прикладное материаловедение

углеродистые сернистые; углеродистые и легированные свинецсодержащие; углеродистые и легированные кальцийсодержащие; легированные кальцийсвинцовсодержащие.

Решающую роль для повышения обрабатываемости резанием у автоматных сталей играют включения сульфидов свинца и сложных оксидов, в которые входит  $\text{CaO}$ . Под влиянием теплоты, выделяющейся в зоне резания, включения размягчаются и выполняют роль смазочных материалов. Чрезмерный разогрев при высоких скоростях резания сопровождается испарением свинца и снижением стойкости инструмента. Поэтому свинецсодержащие стали рекомендуется обрабатывать со скоростью резания свыше 100 м/мин. Кальцийсодержащие стали наиболее легко обрабатываются твердосплавными инструментами со скоростью резания 150-300 м/мин., так как сложные оксиды с  $\text{CaO}$  обладают повышенной устойчивостью к размягчению. Увеличение количества включений достигается повышенным содержанием фосфора, который также снижает пластичность феррита.

Относительно небольшие добавки  $\text{S}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Ca}$ , а также  $\text{P}$  не очень сильно изменяют механические свойства автоматных сталей по сравнению с аналогичными, не содержащими этих добавок, но все-таки используются для малоответственных деталей, когда требуются высокая точность размеров и малая шероховатость.

К недостаткам автоматных сталей относится анизотропия механических свойств из-за вытянутых по направлению прокатки включений. Автоматные стали с повышенным содержанием углерода ( $\text{A30}$ ,  $\text{AC40}$ ,  $\text{A40Г}$ ) при необходимости подвергают нормализации, закалке и отпуску.

Стали с высокой технологической пластичностью. Под технологической пластичностью понимается способность стали подвергаться горячей и холодной пластической деформации (обработке давлением). Технологическая пластичность зависит от химического состава и структурного состояния стали. Содержание углерода и способ раскисления также влияет на пластичность стали в холодном состоянии.

Для глубокой вытяжки применяют стали с содержанием углерода до 0,1% (для крыльев и кузовов автомобилей, например, применяют стали 08кп или 08пс). При  $\text{C}=0,2-0,3\%$  возможны гибка и незначительная вытяжка, а при  $\text{C}=0,35-0,45\%$  только гибка большого радиуса.

Кроме углерода на степень деформационного упрочнения стали, а следовательно, сопротивление пластическому деформи-



рованию оказывают влияние легирующие элементы, которые располагаются в следующей последовательности: кремний, хром, никель, марганец. Поэтому для глубокой вытяжки используют «кипящие» (раскисленные марганцем) и «полуспокойные» (раскисленные марганцем, алюминием) стали.

Штампуемость сталей (способность к вытяжке) оценивают по технологической пластичности  $\delta$  и по отношению  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ . Рекомендуемое отношение  $\sigma_{0,2}/\sigma_B = 0,55-0,65$ . Еще одним фактором, влияющим на холодное деформирование, является размер зерна, который должен быть не более 5 балла, т.е. средний диаметр не должен превышать 65 мкм. К этой группе в соответствии с ГОСТ 10702-78 относятся низкоуглеродистые и легированные стали, из которых изготавливают детали кузовов автомобилей, корпуса бытовых и промышленных приборов, посуда, емкость и другие штампуемые изделия.

Свариваемость стали. Сварку широко применяют в жилищном и промышленном строительстве, судостроении, мостостроении, строительстве газо – и нефтепроводов и т.д. Детали машин, которые изготавливаются из конструкционных сталей различной прочности (углеродистые и легированные, мартенситно-старяющиеся, ТРИП-стали, цементуемые и улучшаемые), обычно сварке не подвергаются.

Зато строительные, судостроительные и арматурные стали должны обладать высокой свариваемостью, под которой понимают количество допускаемых способов сварки, при которых реакция свариваемых материалов на термомеханический цикл не приводит к появлению пор, непроваров, трещин. Причем особенно опасны трещины, появляющиеся в шве или околошовной зоне, из-за градиентов возникающих напряжений. Такие трещины могут быть горячими или холодными. Первые называют еще и кристаллизационными. Они возникают главным образом в сварном шве в момент его кристаллизации, когда шов находится в полутвердом (кристаллы + жидкость) состоянии. Чем дольше металл находится в таком состоянии, тем больше вероятность появления горячих трещин. Элементы, расширяющие интервал между ликвидус и солидус, повышают чувствительность к горячим трещинам (например, углерод). Холодные трещины возникают в результате мартенситного превращения. Поэтому легирующие элементы, способствующие переохлаждению аустенита до Mn в зонах, нагретых выше критических температур, вызывают появление холодных трещин, как и повышенное содержание углерода, увеличивающего объемный эффект мартенситного превращения.



## Физическое и прикладное материаловедение

Таким образом, химический состав стали, а особенно повышенное содержание углерода - важнейший фактор, определяющий свариваемость сталей.

Влияние содержания углерода, легирующих элементов и примесей характеризуются углеродным эквивалентом, который определяют по различным формулам, дающим близкие результаты. Согласно ГОСТ 27772-88 углеродный эквивалент СЕ определяют по формуле:

$$CE = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + Mo/4 + Ni/40 + Cu/13 + V/14 + P/2,$$

где символы - массовые доли элементов в процентах. При  $CE \leq 0,35$  - сварка не вызывает затруднений, при  $CE = 0,35-0,6$  - сварка должна проводиться с соблюдением мер предосторожности, при  $CE > 0,6$  - вероятность возникновения трещин велика.

Строительные стали. Это стали с содержанием углерода меньше 0,22-0,25%, повышение их прочности достигается легированием дешевыми элементами: марганцем и кремнием. В России установлены семь основных классов прочности: от=225МПа, 285МПа, 325МПа, 390МПа, 440МПа, 590МПа, 735МПа.

Сталь от  $\geq 225$ МПа называют сталью нормальной прочностью. Это, как правило, углеродистые горячекатаные стали (СтЗ, СтЗпс, СтЗкп).

Стали трех следующих классов называют сталями повышенной прочности. Это низколегированные стали С285 (СтЗГпс), С345 (09Г2С), С390 (14Г2АФ), а также стали для автодорожных и железнодорожных мостов (ГОСТ 6713091); 15ХСНД с от =345МПа и 10ХСНД с от =390МПа.

Прокат из низколегированных строительных сталей поставляется после горячей прокатки и имеет ферритно-перлитную структуру, но в ряде случаев листовой прокат для повышения хладостойкости подвергается термообработке - нормализации или улучшению.

Стали с от  $\geq 440$  МПа называют сталями высокой прочностью, к ним относятся стали с карбонитридным упрочнением С440 (16Г2АФ) и С550 (18Г2АФ), которые подвергаются нормализации с нагревом до 890-9500С, в результате чего выделяются карбонитриды диаметром 10-100 мкм, что и увеличивает предел текучести, а также экономнолегированные стали 12Г2СМФ, 14Х2ГМР с от=590МПа и 12ГН2МФАЮ, 12ХГН2МФАЮ, с от =735-785МП, которые подвергаются закалке в воду с 890-9200С и отпуску при 650-6800С.

Судостроительные стали (ГОСТ 5521-93). Различают судостроительные стали нормальной, повышенной прочности и хладостойкой.



## Физическое и прикладное материаловедение

стойкие. В соответствии с классификацией Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО) эти стали обозначаются марками А, В, D, и Е, различающимися температурами испытания на ударный изгиб: у марки А нет ограничения, у марки В энергия изгиба не должна быть меньше 27,5Дж при 00 С, у марки D при -200С, у марки Е при -400С. Марки А, В, D, Е относятся к сталям высшей категории качества ( $P \leq 0,025\%$ ,  $S \leq 0,025\%$ ).

К судостроительным сталям нормальной прочности относятся углеродистые стали обыкновенного качества ( $P=0,04\%$ ,  $S=0,05\%$ ) группы В, т.е. с гарантированными химическим составом и механическими свойствами, например, ВСтЗкп, ВСтЗсп, ВСтЗпс и другие, у которых  $\sigma_T \geq 330$  МПа.

Судостроительные стали повышенной прочности должны иметь  $\sigma_T \geq 315$  МПа. К ним относятся низколегированные стали 09Г2, 09Г2С, 10ХСНД (первая категория качества) и стали высшей категории качества по классификации МАКО (А32, Д32, Е32, А36, Д36, Е36, А40, Д40, Е40).

Область применения сталей с нормальной и повышенной прочностью: корпуса судов и кораблей, корпусные конструкции плавающих буровых и других морских сооружений, постоянно эксплуатируемых в нормальных климатических условиях; из этих сталей нельзя изготавливать сварные конструкции арктических судов и буровых платформ.

Сварные конструкции, используемые в арктических условиях, изготавливают из специальных хладостойких сталей (повышенной прочности): 10ГНБ-Ш, 10ХНДМ-Ш с  $\sigma_T \geq 355-390$  МПа, 12ХН2МД-Ш, 12ХН3МДФ-Ш, 12ХН4МДБ-Ш, которые используют для изготовления ледовых поясов атомных ледоколов, плавающих буровых установок и морских сооружений арктического назначения, для резервуаров хранения и транспортировки сжиженных газов.

При эксплуатации до -30...-400С стали изготавливают открытыми методами выплавки, а при температурах до -50...-600С электрошлаковым переплавом.

Арматурная сталь подразделяется по классам прочности, которые обозначаются римскими цифрами от I до VIII, записываемыми через дефис после буквы А (А-I, А-II...А-VIII). Минимальное значение  $\sigma_T$  (МПа) у арматурных сталей класса А-I – 235, А-II – 294, А-III – 390, А-IV – 585, А-V – 780, А-VI – 980, А-VII – 1170, А-VIII – 1350.

Для ненапряженных конструкций применяют арматурную



## Физическое и прикладное материаловедение

сталь классов А-I, А-II, А-III, к которым относят углеродистые стали обыкновенного качества (Ст3, Ст5) и низколегированные 18ГС, 35ГС, 25ГС2 в горячекатаном состоянии.

Для предварительно напряженных железобетонных конструкций (бетон сжат вложенными в конструкцию стальными стержнями) применяют арматурные стали классов А-IV - А-VIII. К ним либо стали обыкновенного качества (Ст5-6) после упрочняющей термообработки (закалка в воду и отпуск 4000С), либо малоуглеродистые легированные стали (20ХГ2Т, 23Х2Г2Т), обладающие хорошей свариваемостью, либо средне – и высокоуглеродистые стали (35ГС, 45ГС, 45С, 50С), которые практически не свариваются.

К литейным сталям (ГОСТ 977-88) относятся стали, предназначенные для изготовления деталей требуемой конфигурации заливкой в песчаные, а реже в чугунные и стальные формы (изложницы). Они обладают температурой плавления в пределах 1482-15180С, хорошей жидкотекучестью, малой усадкой и стойкостью к образованию горячих и холодных трещин.

Характеристики прочности, пластичности и надежности литейных сталей близки к аналогичным характеристикам деформированных сталей, при этом расходы на мехобработку минимальны. Вместе с тем применение литейных сталей ограничено из-за химической неоднородности (зональной ликвации), разнотерности, наличия дефектов: микропор, раковин, трещин и др.

Термическая обработка отливок по обычным режимам не устраняет структурных особенностей литейной стали. Поэтому для устранения химической неоднородности проводят высокотемпературную гомогенизацию и нормализацию для подготовки к окончательной термообработке.

Из литейных сталей изготавливают:

диски, звездочки, зубчатые колеса и венцы, шкивы, барабаны и другие детали, к прочности которых предъявляют высокие требования, работающие при статических и динамических нагрузках (20ГЛ, 35ГЛ, 35ХМЛ, 20ХМЛ);

корпусные детали гидротурбин, лопасти гидротурбин (20ГСЛ, 20ГСФЛ);

детали вагонов, детали металлургического и горнодобывающего оборудования (20Г2ФЛ, 20ФЛ, 30ГЛ, 30ХЛ).

литые детали экскаваторов (30ХГСФЛ и т.д.)

Стали триботехнического назначения. Машиностроительные материалы должны обладать не только прочностными свойствами, но и способностью надежно контактировать в подвижных



## Физическое и прикладное материаловедение

соединениях. Свойства материалов, обеспечивающих подвижность соединения, определяются условиями оптимизации процесса трения, т.е. они должны обеспечивать необходимость минимизации или, наоборот, максимизации коэффициента трения и повышение устойчивости деталей узлов трения.

Материалы триботехнического назначения подразделяются на три группы: износостойкие материалы; антифрикционные материалы; фрикционные материалы. Стали используют только в качестве износостойких материалов.

Стали с высокой износостойкостью. Износостойкость сталей, т.е. свойство стали оказывать сопротивление изнашиванию, существенно зависит от условий трения. В случае обычного трения поверхность металла наклепывается и сопротивляемость возрастает. Следовательно, способность металла к наклепу и определяет его износостойкость.

В случае абразивного износа, когда частицы абразива «вырывают» микрообъемы металла, стойкость против износа будет определяться сопротивлением стали хрупкому разрушению и ее твердостью.

Эффективными способами повышения стойкости против абразивного износа являются поверхностная закалка и другие методы повышения поверхностной твердости (цементация, азотирование, борирование и т.д.) При этом наилучшей структурой является мартенсит и карбиды, причем структура должна быть мелкокристаллической, т.е. более вязкой.

Высокой стойкостью против износа обладают графитизированные стали ЭН293 (C=1,5-1,75%; Si=0,75-0,95%; Mn=0,2-0,4%), ЭН336 (C=1,5-1,7%; Si=0,7-1,0%, Mn=0,15-0,40%), которые после отжига имеют структуру зернистого перлита с определенным количеством мелких округлых графитовых включений. Эти включения в процессе изнашивания выходят на поверхность трения, разрушаются по плоскостям спайности и образуют тончайшие пластинки, которые выполняют роль твердой смазки в процессе сухого трения металла о металл.

В отожженном состоянии графитизированную сталь принимают как заменитель цветных металлов - латуни или бронзы. В термообработанном состоянии – для траков, калибров и других деталей, подвергающихся в работе большим давлениям и износу. Кроме того из графитизированной стали изготавливают литые коленчатые валы.

К этой же группе (износостойких) сталей относятся сталь Гадфильда (Г13), хорошо работающая при трении с высокими



давлениями и ударными нагрузками: траки гусеничных машин, крестовины железнодорожных рельсов, черпаки экскаваторов, детали камнедробилок и др. Сталь Гадфильда содержит 1,0-1,4%С и 12-14%Мп, применяется в литом или реже в горячекатаном состоянии.

Термическая обработка стали Г13 заключается в закалке в воду с температуры 1050-1100С, после чего образуется чисто аустенитная структура без избыточных карбидов. Такая структура обладает высокими вязкостью и пластичностью при достаточно хорошей прочности ( $\sigma_{0,2}=225-390\text{МПа}$ ,  $\delta=40-50\%$  HB180-220).

Высокая износостойкость при трении с давлением и ударами обеспечивается высокой упрочняемостью стали Гадфильда при пластическом деформировании. Пластическая деформация стали Г13 осуществляется путем механического двойникования аустенита. Двойники, с одной стороны, являются эффективными барьерами для движения дислокаций, т.е. упрочняют сталь, а с другой, - приводят к релаксации внутренних напряжений, предотвращая их локализацию и образования трещин. Вместе с тем для абразивного износа (когда нет высокого давления и наклепа) сталь Гадфильда не имеет преимуществ по сравнению со сталями такой же твердости.

Шарикоподшипниковые стали (ГОСТ801-78). К ним относятся высококачественные стали, способные противостоять сложным сосредоточенным и переменным напряжениям, возникающим в зоне контакта шариков и роликов с беговыми дорожками колец подшипников качения. Наряду с основным назначением эти стали используют, когда требуется высокая износостойкость при сосредоточенных переменных нагрузках (детали высокого давления, храповые механизмы, пальцы, ролики и др.)

Шарикоподшипниковые стали должны обладать высокой твердостью, поэтому применяют высокоуглеродистые стали типа инструментальных, а иногда низкоуглеродистые в цементованном состоянии.

Для уменьшения критической скорости закалки и возможности использовать в качестве закалочной среды масло шарикоподшипниковую сталь легируют хромом. При этом, чем меньше размер детали подшипника, тем меньше может быть содержание хрома.

Шарики и ролики диаметром 10-13,5 мм изготавливают из стали ШХ9 (Cr=0,9-1,2%), диаметром до 20мм из ШХ12, а большего диаметра – из стали ШХ15. Ролики диаметром больше 30мм и кольца толщиной стенки больше 15мм изготавливают из стали



ШХ15СГ, в которую кроме хрома для увеличения прокаливаемости вводят кремний и марганец.

Из-за локальности нагрузки в шарикоподшипниках к подшипниковым сталям предъявляются весьма высокие требования в отношении чистоты по неметаллическим включениям и карбидной ликвации, поскольку последние могут вызывать местное разрушение – выкрашивание.

Термическая обработка деталей шарикоподшипника (шарики, ролики, кольца) состоит из двух операций – закалки с 830-8400С в масло и отпуска при температуре 150-1600С в течение 1-2 часов, что обеспечивает получение твердости больше 62HRC. Структура подшипниковых сталей после такой термообработки представляет отпущенный мелкоиглочатый мартенсит (скрытокристаллический) с равномерно распределенными избыточными карбидами и 5-10% остаточного аустенита, который в процессе эксплуатации может превращаться в мартенсит.

К сталям с высокими упругими свойствами относятся пружинные стали. Их упрочняют пластическим деформированием, термической (термомеханической) обработкой. К механическим свойствам пружинных сталей предъявляются те же требования, что и к механическим свойствам конструкционных сталей – высокая прочность и сопротивление разрушению. Кроме того, они должны обладать сопротивлением малым остаточным деформациям в условиях кратковременного и длительного нагружения, которое в первом случае характеризуется пределом упругости, а во втором – релаксационной стойкостью. В свою очередь эти свойства зависят от химического состава и структуры стали.

Пружинные стали классифицируют по основным способам упрочнения и назначению. В зависимости от способа упрочнения пружинные стали подразделяются на стали, упрочняемые холодной пластической деформацией с последующей термической обработкой, и стали, упрочняемые закалкой.

Стали упрочняемые холодным пластическим деформированием. К ним относятся высокоуглеродистые стали 65, 65Г, 70, У8, У9, У10, которые подвергаются патентованию (изотермическая обработка в свинцовых или соляных ваннах при температурах пониженной устойчивости аустенита в перлитной области, целью которой является получение тонкопластичного перлита) и последующей протяжке при степенях деформации не менее 70%. После деформирования стали подвергают отпуску 150-3500С для снятия напряжений и повышения предела упругости и релаксационной стойкости.



## Физическое и прикладное материаловедение

Стали, упрочняемые закалкой. К ним относятся углеродистые и легированные стали перлитного класса с содержанием углерода от 0,4 до 1,0%. Требуемые механические свойства у таких сталей достигаются закалкой с температуры 850-8700С в масле или в воде и последующим отпуском при 410-5200 С. После такой термической обработки  $\sigma_{0,2}$  у углеродистых сталей не менее 800 МПа, а у легированных сталей не менее 1000 МПа.

Пружинные стали должны обладать хорошей прокаливаемостью и закаливаемостью. Мартенситная структура после закалки должна быть по всему объему, причем чем мельче зерно, тем выше сопротивление стали малым пластическим деформациям.

Для пружин малого сечения (менее 5мм) применяют углеродистые стали (ГОСТ 1435-90) У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А, 65, 70, 75, 80, которые закаливаются в масле. Эти же стали используются для пружин с сечением 5-8мм, но закаливаются в воде.

Для более ответственных пружин (испытывающих высокие напряжения) и пружин большого сечения в качестве пружинных используют легированные стали, содержащие 1,5-2,8% кремния, 0,6-1,2% марганца, 0,2-1,2% хрома, 0,1-0,25% ванадия, 0,8-1,2% вольфрама и 1,4-1,7% никеля. Эти элементы обеспечивают прокаливаемость и закаливаемость, измельчают зерно, повышают предел упругости и релаксационную стойкость. С другой стороны, легирование этими элементами позволяет повысить температуру отпуска (выше интервала необратимой отпускной хрупкости), а следовательно, повысить еще и вязкость пружинной стали.

Широко используются (ГОСТ 14959-79) марганцовистые стали 60Г, 65Г, 70Г с  $\sigma_{0,2} \approx 800$  МПа, кремнистые стали 50С2, 55С2А, 60С2, 60С2А, 70С3А, в которых кремний значительно упрочняет феррит и поэтому у них  $\sigma_{0,2} = 1200-1600$  МПа. Из таких сталей изготавливают пружины вагонов и танков, рессоры многих автомобилей, торсионные валы и т.д.

К недостатку кремнистых сталей относится их склонность к обезуглероживанию, образованию дефектов при горячей деформации. Для устранения этих недостатков кремнистые пружинные стали дополнительно легируют хромом, марганцем, никелем, ванадием, вольфрамом (60С2Г, 55С2ГФ, 60С2ХА, 60С2ХФА). Перечисленные стали относят к пружинным сталям общего назначения.

В ряде случаев пружинные элементы кроме упругих



## Физическое и прикладное материаловедение

свойств должны обладать и другими характеристиками – коррозионной стойкостью, немагнитностью и т.д. Такие пружинные стали называют пружинными сталями специального назначения. К ним относятся стали:

- мартенситного класса (20X13, 30X13, 40X13, 20X17H2);
- аустенитного класса (12X18H9, 12X18H9T, 17X18H9);
- аустенитно-мартенситного класса (09X15P8Ю,

08X17H5M3).

Наиболее широко применяют мартенситные стали 30X13 и 40X13, которые подвергают закалке с 1000-10500С в масле и отпуску 300-3500С, а если пружина подвергается нагреву в процессе эксплуатации, то температуру отпуска повышают до 500-5500 С.

Для повышения прочности после закалки стали этого класса подвергают холодному пластическому деформированию, обработке холодом при температуре -700 С, а затем старению при 450-5000 С в течение 4-5 часов.

Немагнитные аустенитные стали, например 12X18H10Т, подвергаются следующей схеме упрочнения: закалка→ холодное пластическое деформирование с высокой степенью обжатия→отпуск 400-4500 С.

### 1.1.4. Стали, устойчивые к воздействию температуры, рабочей и внешней среды

Жаростойкими сталями (окалиностойкими) (ГОСТ 5632-72) называют стали, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 5500С и работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии.

Обеспечивать жаростойкость - означает повышать сопротивление стали окислению при высоких температурах. Сам процесс окисления в сталях – процесс сложный: на первой стадии это чисто химический процесс образования окислов, но в дальнейшем окисление, наряду с химическим соединением кислорода с Fe, сопровождается диффузией атомов кислорода и металла через многофазный окисленный слой. При образовании на поверхности плотной оксидной пленки скорость нарастания окалины определяется диффузией атомов через эту пленку. Поэтому для повышения окалиностойкости сталь легируют элементами, которые благоприятно изменяют состав и строение окалины. Так, в результате введения в сталь хрома, алюминия и кремния, обла-



дающих большим родством к кислороду, чем железо, в процессе окисления образуются очень плотные пленки  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $SiO_2$ , диффузия через которые происходит крайне трудно. Чем выше содержание алюминия, хрома, кремния в стали, тем выше окалиностойкость и тем может быть выше рабочая температура (колеблется в пределах 900-13000С).

Различают высокохромистые (12Х17, 15Х25Т) и хромоникелевые (12Х18Н9, ХН32Т, ХН45) жаростойкие стали. Первые из них являются ферритными и при работе в нагретом состоянии становятся крупнозернистыми (охрупчиваются). Поэтому из них изготавливают изделия, которым несвойственны значительные, особенно ударные, нагрузки (электронагреватели, детали печей и т.д.).

Хромоникелевые стали имеют аустенитную структуру и используются для более нагруженных деталей печей: направляющие, вентиляторы, конвейеры и т.д.

Жаропрочные стали. Жаропрочность – это способность материала противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах. Повышение температуры сильно понижает все механические свойства. При этом следует иметь в виду, что в условиях малой скорости нагружения разрушение происходит при более низких напряжениях. С другой стороны, чем выше температура, тем ниже разрушающее напряжение для определенной продолжительности воздействия, т.е. в общем случае при повышенных температурах прочность металла определяется двумя факторами – температурой и временем. Исходя из этого жаропрочность характеризуют тремя показателями:

- предел кратковременной прочности, который определяется как при обычных испытаниях, но с нагревом образца до заданной температуры. Эта характеристика используется для расчета на прочность деталей, работающих при высоких температурах весьма непродолжительное время (секунды, минуты);

- предел длительной прочности - это напряжение, вызывающее разрушение образца при данной температуре через конкретный промежуток времени. Например,  $\sigma_{600100} = 250 \text{ МПа}$  означает, что при температуре 6000С напряжение 250МПа вызывает разрушения через 100 ч.;

- предел ползучести – напряжение, которое за установленное время испытаний при данной температуре вызывает заданное удлинение образца или заданную скорость деформации (ползучести). Например,  $\sigma_{6001/1000} = 200 \text{ МПа}$  означает, что для удлинения образца на 1% за 1000 часов при температуре 6000 С



предел ползучести должен быть равным 200МПа. Если напряжение будет повышено, то увеличится и суммарная деформация. Обычно длительность работы изменяется от 1000 ч. до 100000 ч., а деформация меняется в пределах от 0,1 до 1%.

Явления, происходящие в металле при ползучести, основываются на следующем. Пластическая деформация (наклеп) вызывает упрочнение металла. Однако при высокой температуре, когда подвижность атомов велика, происходит динамическая рекристаллизация и снятие наклепа. Эти два процесса - наклеп и динамическая рекристаллизация - конкурируя друг с другом во времени при повышенных температурах, и определяют характер ползучести.

Повышение жаропрочности достигается легированием твердого раствора элементами, которые повышают  $T_{рек}$  (молибден, никель, кобальт, титан, ванадий). Введение таких элементов увеличивает энергию связи между атомами, в результате чего процессы диффузии и самодиффузии задерживаются, что и приводит к росту  $T_{рек}$ . Кроме этого, при введении этих элементов создается возможность получения специальной структуры, состоящей из вкрапленных в твердый раствор и по границам зерен дисперсных карбидных и интерметаллидных фаз, получающейся в результате закалки с высоких температур и последующего старения.

Различают теплостойкие и аустенитные жаропрочные стали. К теплостойким сталям, работающим длительное время при температурах 450-650<sup>o</sup>С, относятся перлитные и мартенситные легированные стали (ГОСТ 20072-74).

Перлитные жаропрочные стали работают при температурах 450-580<sup>o</sup>С. При низком содержании углерода (до 0,15%) они хорошо подвергаются стыковой сварке и применяются для изготовления деталей теплоэнергетических установок (пароперегреватели, коллекторы, паропроводы и другие). При содержании углерода 0,25-0,30% перлитные жаропрочные стали не свариваются, и из них изготавливают валы, цельнокованные роторы паровых турбин и крепежные детали. Основой этих сталей является феррит, а избыточной фазой – карбиды. Жаропрочность в них обеспечивается введением в небольших количествах (около 1%) молибдена, хрома и ванадия, которые повышают температуру рекристаллизации, а ванадий еще и измельчает зерно. Такие стали после охлаждения на воздухе имеют перлитную структуру с карбидом  $M_3C [(Fe, Cr, Mo)_3 C]$ , а после закалки в масле мартенситную или бейнитную структуру.



Традиционно жаропрочные перлитные стали (12ХМ, 15ХМ, 12Х1МФ) термически обрабатываются – проводят закалку в масло или нормализацию с последующим отпуском 720-750<sup>0</sup>С. После такой термообработки предел ползучести сталей  $\sigma_{1/100000}^{560} \approx 85 \text{ МПа}$ , а предел длительной прочности  $\sigma_{100000}^{560} \approx 140 \text{ МПа}$ .

Мартенситные и мартенситно-ферритные жаропрочные стали – это сложнолегированные стали. Они в равной степени закаляются от 1020-1030<sup>0</sup>С и на воздухе и в масле, а затем отпускаются при температуре, превышающей рабочую (580-620<sup>0</sup>С). Типичными жаропрочными мартенситными сталями являются 12Х2МФБ, Х5ВФ. Увеличение содержания хрома до 10-12% переводит сталь в мартенсито-ферритное состояние (25Х11МФ, 1Х12ВНМФ). В составе всех этих сталей находятся вольфрам, молибден, ниобий, титан, которые повышают  $T_{рек}$  и образуют карбиды типа  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_2C$ ,  $MC$ , которые коагулируют существенно медленнее. Все это в совокупности и повышает жаропрочность. Длительная прочность мартенситных и мартенситно-ферритных сталей выше, чем у перлитных, и составляет 150-200 МПа.

Для выпускных клапанов и других деталей двигателей внутреннего сгорания применяют хромокремнистые стали мартенситного класса (сильхромы) (ГОСТ 5632-72); Х6С, Х6СМ, Х7СМ, Х10С2М, Х13Н7С2. Сильхромы кроме жаропрочности обладают и высокой окалиностойкостью (жаропрочностью) – у стали Х13Н7С2 интенсивное окисление начинается после 1000<sup>0</sup> С. Как правило, сильхромы подвергаются закалке с 1000-1050<sup>0</sup> С и отпуску 750-780<sup>0</sup> С.

*Аустенитные жаропрочные стали.* Это высоколегированные, в основном хромоникелевые стали (ГОСТ 5632-72). По жаропрочности они превосходят теплостойкие и используются при температурах 600-850<sup>0</sup> С, например, в форсированных дизельных двигателях, лопатках турбин и других «горячих» деталях реактивных двигателей.

Для получения структуры аустенита в эти стали вводят много хрома, никеля, марганца, а для повышения жаропрочности их дополнительно легируют молибденом, вольфрамом, ванадием, ниобием и др. Типичные аустенитные жаропрочные стали: 09Х14Н16Б, 08Х18Н10Т, 45Х14Н14В2М, 10Х11Н20ТЗР, ХН35ВТЮ.

Аустенитные стали пластичны и хорошо свариваются, но сварной шов у них обладает повышенной хрупкостью. По сравнению с теплостойкими сталями обработка резанием более затруд-



нительна. По способу упрочнения аустенитные жаропрочные стали можно разделить на три группы (римскими цифрами в маркировке): гомогенные стали; стали с карбидным упрочнением; стали с интерметаллидным упрочнением. Первые из них (цифра I) не подвергаются дисперсионному твердению, хотя и содержат вторичные фазы, но в количествах, не вызывающих сильного эффекта старения.

*Гомогенные аустенитные жаропрочные стали.* Применяются преимущественно в энергомашиностроении (трубы паронагревателей и паропроводов силовых установок, работающих при 600-700<sup>0</sup>С) после закалки с 1100-1160 <sup>0</sup>С в воде или на воздухе, после чего обладают необходимой прочностью и высокой пластичностью.

Гомогенные стали хорошо сопротивляются образованию окалины до температур 750-800<sup>0</sup>С, обладают кратковременной прочностью  $\sigma^{600}=400-450\text{МПа}$ ,  $\sigma^{700}=300-380\text{МПа}$ ,  $\sigma^{800}=250-380\text{МПа}$ , и длительной прочностью  $\sigma_{100}^{600}=250-350\text{МПа}$ ,  $\sigma_{600}^{700}=120-240\text{МПа}$ ,  $\sigma_{1000}^{600}=200:300\text{МПа}$ ,  $\sigma_{1000}^{700}=1000:180\text{МПа}$ .

Стали с карбидным упрочнением (цифра II) – это стали, содержащие 0,3-0,5% углерода, легированные молибденом, вольфрамом, ванадием, ниобием; другими упрочняющими фазами могут быть первичные (TiC, VC, ZrC, Nb и др.) и вторичные карбиды ( $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$ ,  $M_7C$ ), выделяющиеся из твердого раствора (аустенита) при отпуске – старении. Термическая обработка состоит в закалке с 1050-1200 <sup>0</sup>С и старении, после которого происходит дисперсное твердение за счет выделения карбидных избыточных фаз преимущественно по границам зерен.

Из этих сталей изготавливают лопатки турбин, диски, крепежные детали и др. Стали имеют высокую и кратковременную и длительную прочность.

Стали с интерметаллидным упрочнением (цифра III) – это сложнелегированные стали, в состав которых кроме традиционных для жаропрочных сталей хрома, никеля, вводят титан, ванадий, молибден, бор. Содержание углерода в этих сталях около 0,1%, поэтому карбиды практически не образуются. Жаропрочность достигается в результате выделения интерметаллидных дисперсных фаз после закалки с 1080-1130 <sup>0</sup>С на воздухе и старении при 700-750 <sup>0</sup>С.

Изготавливают из аустенитных жаропрочных сталей с интерметаллидным упрочнением камеры сгорания, лопатки и диски турбин и компрессоров, шпильки, болты и другие детали, работающие при температурах 750-850 <sup>0</sup>С.



**Хладостойкие стали для криогенной техники.** К ним относят стали для изготовления машин и оборудования, предназначенных для получения, перевозки и хранения сжиженных газов, т.е. эксплуатируемых до температур кипения кислорода ( $-183^{\circ}\text{C}$ ), неона ( $-247^{\circ}\text{C}$ ), водорода ( $-253^{\circ}\text{C}$ ), гелия ( $-269^{\circ}\text{C}$ ), азота ( $-196^{\circ}\text{C}$ ); сжиженных углеводородов (метан, бутан и другие) с температурой кипения ( $-80$ –( $-180^{\circ}\text{C}$ ).

К этим же (хладостойким) сталям относят стали, предназначенные для работы при низких климатических температурах до  $-600\text{ C}$ , которые называют сталями северного исполнения. Хладостойкие стали должны иметь необходимую прочность в сочетании с высокими вязкостью и пластичностью, обладать низкой чувствительностью к концентрации напряжений и низкой склонности к хрупкому разрушению.

При снижении температуры показатели прочности ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_0,2$ ) повышаются, а пластичность и вязкость снижается. Поэтому прочность должна гарантироваться при комнатной температуре (так как при низкой температуре она будет заведомо выше), а пластичность и вязкость – при низшей температуре эксплуатации. Одним из критериев хладостойкости является температура, при которой ударная вязкость стали достигает  $0,3\text{ МДж/м}^2$ .

Лучшими хладостойкими сталями являются аустенитные и мартенситно-старяющие. Эти стали сохраняют достаточную вязкость при рабочих температурах до  $-2690\text{ C}$ . Для менее вязких сталей нижняя граница рабочих температур может составлять  $-1200\text{ C}$ .

Наиболее технологическими свойствами хладостойких сталей являются свариваемость и пластичность, необходимые для изготовления труб и тонкостенных конструкций.

Никелевые низкоуглеродистые стали. В криогенной технике применяют никелевые низкоуглеродистые стали, которые хорошо свариваются и обрабатываются резанием, удовлетворительно штампуются в горячем и холодном состоянии.

Термическая обработка сталей 0Н6 и 0Н9 заключается в двойной нормализации и последующем отпуске. Целью первой нормализации (с нагревом до  $9000\text{C}$ ) является гомогенизация стали в области  $\gamma$ -твердого раствора, вторая же нормализация (с нагревом до  $7900\text{C}$ ) производится для измельчения зерна. Вторую нормализацию иногда заменяют на закалку в воде с температуры  $8300\text{C}$ . После двойной нормализации или нормализации и закалки производится отпуск при  $560$ – $5900\text{C}$  с охлаждением на воздухе.

Стали 0Н6 и 0Н9 относятся к ферритным (ферритно-мартен-



## Физическое и прикладное материаловедение

ситным) сталям и имеют в 3-4 раза большую теплопроводность и на ~30% меньший коэффициент линейного расширения по сравнению с аустенитными хромоникелевыми сталями.

Сталь 0Н6 используют для изготовления оболочек, днищ, патрубков статически нагруженных аппаратов и сосудов, работающих под давлением при температуре до  $-1600\text{C}$ . При динамическом характере погружения не ниже  $-1200\text{C}$ .

Сталь 0Н9 используется для изготовления емкостей и резервуаров, предназначенных для транспортировки и хранения жидкого кислорода, азота, сжиженного природного газа, регенераторов воздухоразделительных установок, т.е. для статически нагруженного оборудования, работающего до  $-1960\text{C}$ .

Коррозионно-стойкие стали, упрочняемые старением. В криогенной технике применяются коррозионно-стойкие дисперсионно-твердеющие стали аустенитного класса 08X15H2B4TP и 10X11H23T3MP, а также мартенситно-старяющиеся стали 03X9K14H6M3Д и 03X14K14H4M3ТФ.

Для них применяются два вида термообработки:

- горячее деформирование и старение при  $720-7500\text{C}$  в течение 16ч;

- закалка и старение.

Стали этой группы применяют для изготовления нагруженных несварных деталей: подвесок внутренних сосудов криогенных емкостей, штоков арматуры, фланцевых соединений, пружин.

Сталь 03X9K14H6M3Д применяют для изготовления высоконагруженных деталей, в том числе седел клапанов, а также лопаток, валиков, подшипников, у которых должны сочетаться высокие твердость и коррозионная стойкость.

Рекомендуемый режим термообработки этой стали - двойная закалка (с  $8600\text{C}$  в воду и с  $7300\text{C}$  в воду) и старение при  $5200\text{C}$  в течение 3 ч.

Сталь 03X14K14H4M3ТФ термообрабатывается путем закалки с  $10500\text{C}$  в воду, обработки холодом с последующим старением в течение 6 ч при температуре  $5200\text{C}$ . После этого сохраняется 20-30% остаточного аустенита.

Эта сталь используется для изготовления тонколистовых конструкций сложной конфигурации и деталей арматуры, работающих до температуры  $-1960\text{C}$  (золотники, втулки, клапаны, тарелки, штоки, стаканы и т.д.).

Аустенитные криогенные стали. Аустенитные криогенные стали являются основным конструкционным материалом в криогенной технике. Аустенитные стали в отличие от хладостойких



отличаются высокими пластичностью и вязкостью. Их применяют при температуре до (-2690С). Они обладают высокими технологическими свойствами, и поэтому криогенное оборудование изготавливают с применением холодной обработки давлением и сварки.

Как правило, аустенитные стали применяются в закаленном состоянии, причем закалку производят при 10500С в воду, поскольку замедленное охлаждение приводит к выделению по границам зерен карбидов и карбонитридов, снижающих ударную вязкость и приводящих к развитию межкристаллитной коррозии. После закалки в воду аустенитные стали имеют высокую пластичность и вязкость, а также коррозионную стойкость.

Выделяют две группы аустенитных криогенных сталей: хромоникелевые и хромомарганцевые.

Аустенитные хромоникелевые стали. К ним относятся стали 12Х18Н9, 08Х18Н10, 12Х18Н10Т и т.д., которые из-за высокого содержания хрома обладают еще и высокой коррозионной стойкостью. Они эксплуатируются до (-2690С), сохраняя высокую прочность и хладноломкость. Стали используют для изготовления оболочек, днищ, патрубков, фланцев, клапанов, седел и т.д.

К недостаткам этой группы сталей можно отнести высокую стоимость (из-за дорогого и дефицитного никеля) и низкий предел текучести при комнатной температуре.

Аустенитные хромомарганцевые стали. К ним относятся стали, содержащие 12-14%Cr и 17-20%Mn, например, 03Х13АГ19, 10Х14ГМН4Т и другие, которые эксплуатируются до температуры -1960С. Они хорошо свариваются всеми видами сварки и используются для сварных элементов сосудов и трубопроводов, в том числе работающих под давлением.

Коррозионно-стойкие стали (ГОСТ 5632-72). Коррозия – это поверхностное разрушение металла под воздействием внешней среды. Часто металлы теряют металлический блеск и покрываются продуктами коррозии (ржавеют), механические свойства их при этом резко ухудшаются.

По механизму процесса различают:

- химическую коррозию, протекающую при воздействии на металл (сталь) газов (газовая коррозия) и неэлектролитов (нефть и ее производные).

- электрохимическую коррозию, вызываемую действием электролитов, кислот, щелочей, солей.

Стали, обладающие стойкостью против газовой коррозии, называются жаростойкими сталями. Стали же, обладающие стойкостью против электрохимической коррозии, называются корро-



зионно-стойкими, или нержавеющими сталями.

Основными способами повышения устойчивости стали к коррозии являются, во-первых, образование на поверхности защитных пленок, прочно связанных с основным металлом и предотвращающих контакт стали с агрессивной наружной средой, и во-вторых, повышение электрохимического потенциала стали в разных агрессивных средах.

Важнейшим элементом, повышающим (причем скачком) электрохимический потенциал стали, является хром, когда его вводят в сталь в количестве более 12%. В целом же коррозионно-стойкие стали можно разделить на следующие группы:

- 1) хромистые нержавеющие стали, имеющие после охлаждения на воздухе ферритную или мартенситную структуру;
- 2) хромоникелевые нержавеющие стали с аустенитной структурой;
- 3) кислотостойкие стали.

Хромистые нержавеющие стали. Применяют хромистые стали трех типов: с содержанием хрома 13, 17 и 27%.

Стали с 13% хрома устойчивы против коррозии на воздухе, в морской и пресной воде, во многих органических кислотах. Наиболее широко используются стали 08X13, 12X13, 20X13, 30X13, 40X13. Эти стали обладают наилучшей стойкостью против коррозии лишь при условии, что весь хром находится в твердом растворе и в этом случае он образует на поверхности защитную пленку типа  $(Cr, Fe)2O3$ .

Сталь 08X13 обладает чисто ферритной структурой. В сталях же 12X13 и 20X13 после закалки с 1000-11000С в масло и высокого отпуска (700-7750С) присутствуют карбиды в виде крупных частиц.

Стали 30X13 и 40X13 используют для хирургических инструментов, карбюраторных игл и т.д. Эти стали закачивают с 10500С в масло и отпускают при 180-2000С. После чего они сохраняют высокую прочность ( $\sigma_B=1600\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0,2}=1300\text{МПа}$ ), твердость (до HRC50-56) и хорошую устойчивость против коррозии.

Стали с содержанием хрома около 17% (12X17, 08X17Т, 14X17Н2) обладают более высокой коррозионной стойкостью и применяются для производства оборудования легкой и пищевой промышленности. Добавки в них никеля и повышение содержания углерода (сталь 14X17Н2) приводят к мартенситному превращению. Поэтому сталь 14X17Н2 относится к мартенситному классу, 12X17 и 08X17Т – к ферритному.

В тех случаях, когда требуется высокопрочное состояние,



## Физическое и прикладное материаловедение

сталь 14X17H2 подвергают закалке с 10500С в масло и отпуску при 3000С, после чего  $\sigma_B = 110\text{МПа}$ , а  $\sigma_{0,2} = 900\text{МПа}$ .

Стали с 27% хрома применяют для изготовления деталей печей (муфели, чехлы термопар, реторты и т.д.), а также для труб теплообменной аппаратуры, работающей в агрессивных средах. Эти стали, например 15X28, относятся к ферритному классу. К их существенному недостатку относится невозможность (из-за отсутствия фазовых превращений) устранения крупнозернистости, например, термической обработкой.

Хромоникелевые нержавеющие стали. При создании этой группы сталей (12X18H8, 17X18H9, 12X18H9T, 04X18H10, 08X18H12T и др.) учитывалось, что введение большого количества никеля в хромистую сталь переводит ее в аустенитный класс, что обеспечивает лучшие механические свойства, меньшую склонность к росту зерна и большую коррозионную стойкость.

Аустенитные стали с содержанием 8-10% никеля относятся к сталям с неустойчивым аустенитным состоянием, в которых пластическая деформация при комнатной температуре или переохладение в отрицательную область температур может вызывать образование мартенсита.

В сталях с содержанием 10-12% никеля образование мартенсита может произойти только при пластической деформации ниже 00С, и, наконец, стали с содержанием никеля больше 14% обладают стабильным аустенитом, который не превращается в мартенсит при деформации при низких температурах. В хромоникелевых сталях из-за наличия углерода кроме аустенита присутствуют специальные карбиды типа  $M_{23}C_6$ , количество которых зависит от содержания углерода. При комнатной температуре и нагреве до 600-7000С растворимость карбидов не превышает 0,005%, но выше 8000С она резко увеличивается и при 10500С составляет 0,05% , а при 11500С-0,15%. Такая большая разница в растворимости карбидов в аустените при нагреве до высоких температур позволяет при закалке получить пересыщенный твердый раствор, из которого при повторном нагреве до температур 500-7000С, например сварке, по границам зерен может выделиться карбидная фаза, что способствует межкристаллитной коррозии. Это приводит к потере сталью металлического звука и появлению надрывов по границам зерен при изгибе. Металл с сильно развитой межкристаллической коррозией разрушается при незначительных напряжениях.

Склонность к межкристаллитной (интерметаллической) коррозии можно уменьшить снижением содержания углерода



## Физическое и прикладное материаловедение

(меньше 0,005%) и введением так называемых стабилизаторов (титана или ниобия), являющихся сильными карбидообразователями. Введение их в сталь приводит к образованию карбидов типа MC (фазы внедрения), которые связывают углерод и препятствуют образованию карбидов хрома (Fe, Cr) $_{23}C_6$ , а следовательно, сохраняют концентрацию хрома в аустените (особенно вблизи границ зерен).

Хромоникелевые аустенитные нержавеющие стали обладают высокими технологическими свойствами: хорошо прокатываются в горячем и холодном состоянии, в холодном состоянии выдерживают глубокую вытяжку и профилирование, свариваются без охрупчивания в околосварной зоне. Они подвергаются термической обработке с температуры 1100-11500С в воду. Такой нагрев приводит к полному растворению карбидов  $M_{23}C_6$ , а быстрое охлаждение позволяет получить однофазную аустенитную структуру (правда, в виде перенасыщенного твердого раствора). Медленное охлаждение недопустимо, так как возможно выделение карбидов.

Закаленная аустенитная сталь имеет сравнительно невысокую прочность ( $\sigma_B=450-600$ МПа), пониженный предел текучести ( $\sigma_{0,2}=180-210$ МПа), но большую пластичность ( $\delta=40-45\%$ ,  $\psi=55-60\%$ ). Поэтому закаленное состояние называют смягченным состоянием. Упрочнение хромоникелевых сталей осуществляется холодным наклепом, при деформации 80-90%  $\sigma_{0,2}$  повышается до 980-1170МПа, а  $\sigma_B$  до 1370МПа.

Кислотостойкие стали. В производстве синтетических неметаллических материалов (пластмассы, стеклопластики, стекловолокно и т.д.), удобрений и других химических продуктов применяются агрессивные кислотные среды на основе серной, соляной, азотной и фосфорной кислот и их смесей различной концентрации при различных температурах.

Использование для установок и аппаратуры нержавеющих сталей оказывается недостаточно эффективным, поэтому в этих случаях используют более высоколегированные стали, называемые кислотостойкими.

Увеличение стойкости в кислотах дает присадка в аустенитные стали молибдена и особенно молибдена с медью при одновременном увеличении содержания никеля, например, 10X17H13M2T, 06X23H28M3ДЗТ.

При необходимости иметь и высокую кислотность, и высокие механические свойства ( $\sigma_B$  больше 1000МПа) в стали вводят алюминий. В этом случае титан и алюминий в результате выделе-



ния дисперсных фаз типа  $Ni_3(Ti, Al)$  вызывают интерметаллидное упрочнение.

### 1.1.5. Стали с особыми физическими свойствами

К этой группе относятся такие стали, к которым предъявляются требования обеспечения определенного уровня физических свойств (магнитных, электрических, тепловых и др.).

Механические свойства этих сталей чаще всего не имеют основного значения, а вот высокая точность химического состава и технология производства являются определяющими.

Стали с особыми магнитными свойствами (магнитные стали). Различают три группы магнитных сталей: магнитотвердые, магнитомягкие, немагнитные, при этом под магнитной твердостью понимают коэрцитивную силу.

Первые из них обладают постоянной намагничиваемостью во времени и характеризуются большими магнитной индукцией ( $B_r$ ) и коэрцитивной силой  $H_c$ , что и позволяет получать большую магнитную энергию, так как она равна произведению  $B_r \cdot H_c$  (рис. 2).

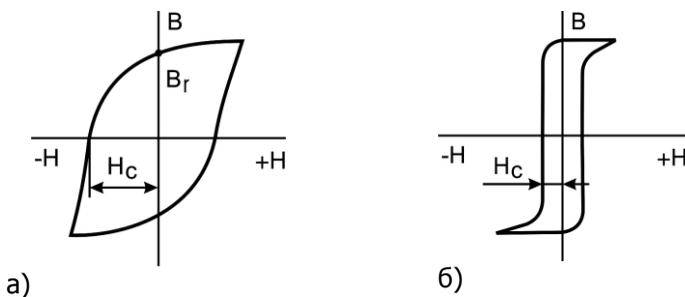


Рис.2. Зависимость магнитной индукции  $B$  от напряженности

магнитного поля  $H$ : а – магнитотвердые материалы;  
 б – магнитомягкие материалы

Для второй группы магнитных сталей характерно малое значение коэрцитивной силы и магнитные потери на гистерезис. Кроме этого они должны иметь высокую магнитную проницаемость в слабых, средних и сильных полях.

И, наконец, немагнитные - это парамагнитные стали аустенитного класса, у которых магнитная проницаемость больше еди-



ницы (Гс/Э).

Из магнитотвердых сталей изготавливают постоянные магниты. Для получения высокой коэрцитивной силы эти стали должны иметь неравновесную структуру, получаемую либо наклепом, либо фазовыми превращениями, обычно закалкой.

Для изготовления небольших по размеру магнитов используются углеродистые стали У10-У12, которые после термической обработки (закалка, обработка холодом и отпуск) имеют  $H_c=60-65Э$  и  $B_r=8000-8500Гс$ .

Для изготовления магнитов больших размеров, а также из-за необходимости иметь более высокие магнитные свойства (по сравнению с углеродистыми) используют высокоуглеродистые стали ( $\sim 1\%C$ ), легированные хромом EX (1,3-1,6% Cr), EX3 (2,8-3,6% Cr), вольфрамом EB6 (5,2-6,2% W) и одновременно хромом и кобальтом EX5K5, EX9K15M2 (ГОСТ 6-862-71). Коэрцитивная сила легированных сталей составляет 60-180Э, а магнитная индукция 8000-10000Гс.

Достоинством магнитотвердых сталей являются их хорошая обрабатываемость резанием и давлением, а к недостаткам можно отнести относительно низкую магнитную энергию (по сравнению с литыми Fe-Ni-Al сплавами типа Ал-нико, у которых  $H_c=400-500Э$ ). Поэтому из сталей изготавливают неотчетливые магниты массового производства.

Окончательные магнитные характеристики достигаются достаточно сложной термической обработкой, которая предполагает:

- 1) предварительную нормализацию после нагрева до температур 10500С (EX3) и 1200-12500С у остальных сталей. Такая операция необходима для растворения крупных включений карбидной фазы;
- 2) закалку с 840-8600С EX3 и EB6 или с 930-9500С EX5K5 и 1030-10500 С EX9K15M2 в воду или масло;
- 3) обработку холодом для устранения парамагнитного аустенита;
- 4) отпуск при 1000С, который хотя немного и снижает коэрцитивную силу, но стабилизирует ее величину во времени.

К магнитно-мягким сталям относят техническое железо (армо-железо) (ГОСТ 3836-83) и легированные электротехнические (кремнистые) стали (ГОСТ 214227-83). Эти стали применяются в электротехнике для изготовления силовых трансформаторов, магнитных цепей электрических машин и других деталей, рабо-



тающих при частотах до 400Гц.

В отличие от магнитотвердых с неравновесной структурой магнитомягкие стали должны иметь близкую к равновесной структуру, а также иметь крупное зерно и минимальный уровень дефектности субструктуры.

Техническое железо. В настоящее время промышленность выпускает две марки технического железа-А с минимальным содержанием углерода и примесей (0,025% С; 0,035% Мn; 0,03% Si; 0,25% S; 0,015% P; 0,15% Cu) и Э (Э, ЭА, ЭАА), в котором чуть больше углерода и примесей (0,04% С; 0,2% Мn; 0,2% Si; 0,03% S; 0,25% P; 0,15% Cu). Для устранения наклепа и получения крупного зерна техническое железо подвергают отжигу при высоких температурах, после которого  $H_c$  получается порядка 1Э.

Электротехническая сталь. Представляет собой низкоуглеродистый железокремнистый сплав (0,05-0,005% С; 0,8-4,8% Si). Кремний, образуя с железом твердый раствор, увеличивает электросопротивление, а следовательно, уменьшает потери на вихревые токи. Кроме того, железокремнистый твердый раствор вследствие искажений в решетке, вызванных наличием в ней инородных атомов кремния, имеет более высокую коэрцитивную силу, чем чистое железо, которая не уменьшается при охлаждении, что несколько снижает значение  $H_c$  и повышает магнитную проницаемость ( $H_c/Br$ ).

Электротехническую сталь изготавливают в виде тонких листов и подвергают отжигу при 1100-12000С либо в водороде, либо в диссоциированном аммиаке, либо в вакууме (для рекристаллизации, укрупнения зерна, выгорания углерода). Резание, холодная штамповка, навивка ухудшают магнитные свойства стали. Возрастает коэрцитивная сила, и, как следствие, потери на гистерезис. Поэтому для восстановления магнитных свойств проводят отжиг при 750-8000С с медленным (меньше 50оС/ч) охлаждением.

Листовую сталь подразделяют по структурному состоянию и виду прокатки на три класса: 1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой.

Для магнитных листовых электротехнических сталей принята иная система маркировки, чем для обычных сталей. Эти стали маркируются четырьмя цифрами, например, 1211, 1413, 2011, 2212, 3411, 3414. Первая цифра – класс по структурному состоянию и виду прокатки; вторая – группа по содержанию кремния; третья – группа по основной нормируемой характеристике, чет-



вертая – порядковый номер типа стали. Другими словами, первые три цифры означают тип стали, а четвертая – номер типа стали (порядковый). Например стали 1211 и 1413 – горячекатаные изотропные с содержанием кремния у первой 0,4-0,8%, а у второй 2,8-3,8%, нормируемой характеристикой которых являются удельные потери. Стали 2011 и 2212 – холоднокатаные изотропные, а стали 3411 и 3414 – холоднокатаные анизотропные с ребровой текстурой.

Анизотропные (текстурированные) стали относятся к трансформаторным. Последние содержат 2,8-3,8% кремния и относятся к ферритному классу сталей, которые не испытывают  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -превращений при нагреве. Магнитные свойства холоднокатаной стали с ребровой текстурой в продольном направлении прокатки значительно выше, чем в поперечном. Это связано с тем, что в каждом зерне текстурированной стали кристаллическая решетка ориентирована так, что в плоскости листа лежит плоскость (110), а в направлении прокатки – ребро куба [100]. Такую текстуру и называют ребровой. Для Fe<sub>2</sub> и сплавов Fe-Si ребро куба [100] является направлением легкого намагничивания. Подобная структура достигается многократной прокаткой и отжигом в водородной среде.

Немагнитные (парамагнитные) стали. Многие детали машин и приборов должны быть изготовлены из немагнитного материала. Ранее для этой цели применяли цветные и, естественно, дорогие сплавы. В настоящее время широко используют немагнитные аустенитные стали 12X18H9, 55Г9Н9Х3, 45Г17Ю3. Нержавеющие стали типа 12X18H9Т достаточно дороги и поэтому в качестве аустенитообразователей используют марганец, хром и алюминий при сравнительно повышенном (до 0,4%) содержании углерода и ограниченном содержании никеля.

Аустенитная структура у сталей этого класса получается закалкой, а упрочнение – холодным наклепом. Поэтому точка Мд у них должна быть ниже 00С, чтобы холодная деформация при комнатной температуре не вызывала мартенситного превращения.

Окалиностойкие стали с высоким омическим сопротивлением. К этой группе относятся стали с высоким электросопротивлением, предназначенные для изготовления проволоки и лент нагревательных элементов печей и т.д. Для этой цели широко используют ферритные стали, содержащие хром и алюминий (последнего не должно быть больше 5-7%, чтобы не охрупчивать сталь), резко увеличивающих окалиностойкость и электросопро-



## Физическое и прикладное материаловедение

тивление. Примерами сталей этой группы являются: X13Ю4 – фехраль, 0X23Ю5 – хромаль, 0X27Ю5А. Содержание углерода в них строго лимитировано (0,06-0,12%), так как появление карбидов снижает пластичность и понижает срок службы нагревателей. Кремний сильно повышает электросопротивление, однако, его содержание не должно превышать 1%, так как при большем содержании сталь теряет способность к горячей деформации.

Номинальное удельное электросопротивление у фехраля (1,26-1,34 Ом·мм<sup>2</sup>/м), у хромалья – 1,3-1,45 Ом·мм<sup>2</sup>/м. Большие значения имеют, естественно, хромоникелевые сплавы, например, нихром X20Н80 (1,05-1,15 Ом·мм<sup>2</sup>/м).

Окалиностойкость колеблется до 10000С у фехраля, до 12000С у стали 0X27Ю5А, причем по этому показателю они не уступают нихрому.

Фехраль широко используется в виде проволоки для изготовления нагрузочных реостатов, бытовых приборов, низкотемпературных печей сопротивления.

Стали же 0X23Ю5 и 0X27Ю5А малопластичны, и из них изготавливают литые элементы сопротивления, которые могут работать при температурах 12000С и выше в атмосфере воздуха, кислорода, водорода, азота, сероводорода, углеводорода.

Стали и сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами (ГОСТ10994-74). В ряде случаев требуются металлы и сплавы с коэффициентом линейного расширения ( $\alpha$ ) близким к 0, а в ряде случаев этот коэффициент должен быть весьма большим. Чтобы удовлетворить эти требования, изготавливают сплавы строго определенного состава (прецизионные сплавы).

Наименьшим из чистых металлов коэффициентом  $\alpha$  обладает платина (при 00С –  $8,9 \cdot 10^{-6}$ , при 8000С –  $9,9 \cdot 10^{-6}$ ) и железо (11,3·10<sup>-6</sup> и 14,8·10<sup>-6</sup> соответственно), наибольшим – алюминий (22,8·10<sup>-6</sup> при 00С и 27, 9·10<sup>-6</sup> при 6000С).

Введение в металл второго элемента вызывает изменение  $\alpha$  следующим образом:

- если оба компонента образуют гетерогенную смесь, то  $\alpha$  изменяется адаптивно;

- если компоненты образуют твердый раствор, то  $\alpha$  изменяется по криволинейному закону, но внутри предельных значений, соответствующих чистым компонентам.

Исключение составляют системы Fe-Ni и Fe-Pt. Так, в железоникелевых сплавах с 25%Ni  $\alpha$  увеличивается почти в два раза по сравнению с Fe, а при 36% Ni  $\alpha$  уменьшается в 8 раз.



## Физическое и прикладное материаловедение

Наиболее известными сплавами с заданными  $\alpha$  в определенном интервале температур являются: инвар (НЗ6), содержащий 36%Ni и практически не расширяющийся в интервале от  $-80^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ ; суперинвар (НЗ1К6), содержащий Ni (31%) и Co (6%) и имеющий  $\alpha=1,0 \cdot 10^{-6}$  в интервале от 0 до  $60^{\circ}\text{C}$ ; платинит Н48, который имеет  $\alpha=9 \cdot 10^{-6}$ , т.е. как у платины и стекла, и поэтому используется для пайки металла со стеклом.

Для пружин точных приборов, камертонов и других подобных изделий требуются материалы с не изменяющимися с температурой модулем упругости – модулем Юнга (E), модулем сдвига (G), модулем касательной упругости.

К этой группе относятся также стали с низким температурным коэффициентом модуля упругости. Из них изготавливают пружины точных приборов, пружины часовых механизмов, камертоны, сильфоны, резонаторы и т.д., которые должны иметь постоянные модули упругости в определенном интервале температур.

Обычно применяют дисперсионно-твердеющие элинвары, имеющие постоянный модуль упругости, это сплавы, содержащие 36-38% никеля, 7-9% хрома, 0,4-0,8% углерода, остальное железо. После закалки с  $950^{\circ}\text{C}$  в воде сплав имеет аустенитную структуру с высокой пластичностью  $\delta=50\%$  и сравнительно низкой прочностью  $\sigma_B=650-700$  МПа. После старения при температуре  $600^{\circ}\text{C}$   $\sigma_B$  возрастает до 1500 МПа, а  $\delta$  уменьшается до 10%. Такое упрочнение достигается благодаря выделению из аустенита интерметаллидов.

Температурный коэффициент элинваров колеблется в пределах  $18-23 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ , что примерно в 10 раз меньше, чем у углеродистых сталей и в 20 раз меньше, чем у аустенитной стали.

### 1.2. Инструментальные стали

Инструментальными называют углеродистые и легированные стали, содержащие в своем составе 0,7-1,5% углерода обладающие высокой твердостью, прочностью и износостойкостью. Их применяют для изготовления режущего, измерительного инструмента и штампов.



### 1.2.1. Углеродистые инструментальные стали для режущего инструмента

Твердость режущей кромки сверл, метчиков, разверток, резцов, фрез и другого режущего инструмента после закалки и отпуска должна быть в пределах HRC 60-65 и значительно превышать твердость обрабатываемого металла.

Для обработки резанием применяют углеродистые стали с теплостойкостью до 2000С, легированные стали с теплостойкостью до 260-2800С и быстрорежущие стали с теплостойкостью до 6400С.

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435-99) называют еще сталями с пониженной прокаливаемостью. Поэтому стали типа У7, У10, У12, У11 применяют для режущих инструментов небольших размеров (диаметром 10-12 мм) или для более крупных инструментов (диаметром 15-30мм), которые при закалке в воде не прокаливаются полностью (напильники, зенкеры, короткие развертки и т.д.)

К достоинствам углеродистых инструментальных сталей можно отнести дешевизну, хорошую обрабатываемость резанием и давлением в отожженном состоянии. К недостаткам – небольшой интервал закалочных температур и необходимость (из-за малой устойчивости переохлажденного аустенита) закалки с охлаждением в воде или водных растворах щелочей (солей), что приводит к короблению и деформации инструмента и способствует образованию трещин. Поэтому режущий инструмент сложной формы с резкими переходами и большим соотношением длины к диаметру из углеродистых сталей не изготавливают.

Температура закалки этих сталей 780-8000С, что позволяет получить структуру мартенсита закалки с нерастворенными частицами вторичного цементита и сохранить мелкое зерно. Для снятия напряжений и сохранения высокой твердости (60-63 HRC) инструмент отпускают при температуре 150-1700С.

Для уменьшения коробления и предотвращения образования трещин при закалке часто применяют закалку в двух охладителях (через воду в масло) и ступенчатую закалку.

Углеродистые инструментальные стали используются также для изготовления инструментов, которые в процессе эксплуатации подвергаются динамическим нагрузкам, ударам, толчкам, а следовательно, должны обеспечивать определенный запас вязкости – зубила, клейма, кузнечный и деревообрабатывающие инструменты и т.д., которые подвергаются отпуску при температурах



250-3250С для получения твердости 48-55 HRC.

### 1.2.2. Легированные инструментальные стали (ГОСТ 5950-2000)

Относятся к сталям повышенной прокаливаемости (критический диаметр после закалки в масле 40-90мм), в меньшей степени, чем углеродистые, подвержены деформации и короблению и поэтому предназначены для изготовления инструмента сложной формы (резьбонарезной инструмент, фрезы, протяжки, сверла и т.д.). Как правило, легированные инструментальные стали содержат 1-3% легирующих элементов (9ХС, Х, ХВСГ и т.д.). Хром в эти стали, как впрочем и кремний, вводят для увеличения прокаливаемости, а марганец увеличивает количество остаточного аустенита при закалке и минимизирует деформации.

Стали этой группы закалывают в масле или горячих средах с температур 850-8750С на структуру мартенсит, вторичный легированный цементит и остаточный аустенит (8-10%). Окончательные механические свойства легированных сталей обеспечиваются низкотемпературным отпуском (150-1600С) в течение 1-1,5 часа, который сохраняет твердость на уровне 61-64 HRC.

К недостаткам легированных инструментальных сталей относится склонность к обезуглероживанию, повышенная твердость в отожженном состоянии, что понижает обрабатываемость резанием, и их невысокая устойчивость против отпуска, т.е. стали могут использоваться при резании с небольшой скоростью и малыми подачами.

Для пил по металлу, граверного инструмента используют стали с повышенным содержанием вольфрама (В2Ф или ХВ5), которые после закалки и низкого отпуска имеют твердость на уровне 67 HRC.

Быстрорежущие стали (ГОСТ 19265-73). Эти стали предназначены для изготовления режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания. Отличительной особенностью быстрорежущих сталей является их высокая теплостойкость (красностойкость), т.е. способность сохранять мартенситную структуру и соответственно высокие твердость, прочность, износостойкость при повышенных температурах, возникающих в режущей кромке (до 600-6200С).

Основными легирующими элементами являются вольфрам и его химический аналог молибден. Быстрорежущие стали вольфрамовые (Р18, Р12, Р9) и вольфрамомолибденовые (Р6М5, Р6М3)



## Физическое и прикладное материаловедение

относятся к сталям нормальной производительности. Их применяют для инструмента чистовой обработки конструкционных и инструментальных углеродистых и легированных сталей (сверла, фрезы, протяжки, развертки, фасонные резцы и т.д.).

Для обработки изделий из высокопрочных, жаропрочных, коррозионно-стойких, нержавеющих сталей, титановых сплавов, пластмасс и других трудно обрабатываемых материалов в состав быстрорежущих сталей вводят кобальт и ванадий (до 3%): Р6М5К5, Р9М4К8, Р3М3Ф3 и т.д. Эти стали относятся к сталям повышенной производительности, и из них изготавливают инструмент для черновой и получистовой обработки: долбяки, фрезы, сверла, резцы.

Быстрорежущие стали относятся к карбидному (ледебуритному) классу. Их фазовый состав в отожженном состоянии представляет собой легированный феррит и карбиды М6С, М23С6, МС, М3С. В феррите растворена большая часть хрома, которого в быстрорежущих сталях около 4%. Почти весь вольфрам, молибден и ванадий находятся в карбидной фазе, основной из которой является М6С.

Для придания стали теплостойкости быстрорежущие стали подвергают закалке с температуры больше 12000С (в зависимости от химического состава Тзак. стали Р6М5 равна 1210-12300С, Р18-1270-12900С) и многократному отпуску. Высокая температура нагрева при закалке необходима для растворения вторичных карбидов и получения высоколегированного аустенита, который в результате закалки превращается в высоколегированный мартенсит, обладающий высокой устойчивостью против отпуска, т.е. теплостойкостью.

Однако даже при таком высокотемпературном нагреве растворяется более 60% карбидов, оставшиеся избыточные (эвтектические и вторичные) карбиды способствуют получению мелкого зерна (балл 10-11). Кроме того, после закалки наряду с мартенситом и карбидами в структуре обязательно присутствует остаточный аустенит (30 и более процентов), который понижает режущие свойства стали. Поэтому после закалки проводят многократный (трехкратный) отпуск, вызывающий превращение остаточного аустенита в мартенсит, что приводит к повышению твердости (вторичная твердость). Отпуск проводится при температуре 550-5700С. В процессе выдержки при этой температуре из аустенита выделяются карбиды типа MeC, что снижает общую насыщенность  $\gamma$ -твердого раствора и способствует его превращению в мартенсит при охлаждении. Для полного устране-



ния Аост отпуск повторяют 2-3 раза (чаще 3), с продолжительностью каждого 45-60 мин.

Твердость сталей после такой обработки – HRC63-65, причем она сохраняется при последующих нагревах до 600-6200С, обеспечивая теплостойкость стали. В ряде случаев многократный отпуск заменяют на обработку холодом и однократный отпуск при 5600С.

Стали для измерительных инструментов должны иметь высокую твердость, износостойкость, сохранять свои размеры при эксплуатации. Для этой цели применяют сталь X (0,95-1,10% С; 1,3-1,65%Cr) или сталь 12X1 с 1,15-1,25%С.

Термическая обработка этого класса сталей базируется на том, что в закаленной высокоуглеродистой стали при комнатной температуре в течение продолжительного времени протекает старение, в результате которого происходит частичный распад мартенсита и превращение некоторого количества Аост в мартенсит. Старение вызывает небольшое изменение объема и линейных размеров, что недопустимо для измерительного инструмента высоких классов точности.

Для предупреждения старения измерительный инструмент после закалки, как правило, обрабатывают холодом при (-65)–(-70)0С для более полного превращения аустенита, а затем длительно (12-24 ч) отпускают при 120-1300С. Твердость после такой обработки HRC62-64.

Измерительные скобы, шаблоны, линейки и другие плоские и длинные инструменты изготавливают из листовой стали 15, 15X, а для получения высокой твердости на поверхности инструмент подвергают цементации и закалке.

Стали для формообразующего инструмента (штамповые стали). Для обработки металлов давлением применяют инструменты, деформирующие металл (штампы, пуансоны, ролики, валки и другие). Стали, применяемые для такого инструмента, называют штамповыми сталями, которые делятся на две группы: стали для холодного деформирования и стали для горячего деформирования. Эти стали работают в различных условиях и поэтому к ним предъявляются различные требования.

При штамповке в горячем состоянии рабочие части штампа контактируют с нагретым деформируемым металлом. Поэтому сталь для горячего деформирования должна обладать определенными механическими характеристиками не только в холодном состоянии, но и при повышенных температурах (особенно это касается высокого предела текучести (упругости), чтобы штамп не



деформировался в горячем состоянии при высоком давлении). Кроме того, стали для горячего деформирования должны выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования трещин разгара, обладать высокой прокаливаемостью и быть нечувствительными к отпускной хрупкости.

Для кузнечных штампов большое значение имеет вязкость, чтобы рабочие части не разрушались при ударах, а для прессового инструмента важнейшее свойство – износостойкость. Еще в более тяжелых условиях работы находится сталь в штампах (пресс – формах) для литья под давлением, поскольку нагрев рабочей поверхности формы расплавленным металлом и охлаждение водой внутренних частей формы вызывают значительные напряжения. Сталь для этого вида инструмента должна быть износостойкой, иметь высокие механические характеристики в нагретом состоянии и хорошо сопротивляться разъеданию поверхности формы расплавленным металлом.

Для штамповки в холодном состоянии стали, из которых изготавливают рабочие части штампов, должны обладать высокой твердостью, износостойкостью и зачастую вязкостью. Именно особенности эксплуатации при обработке давлением вызывают необходимость использовать в качестве штамповых сталей различные марки сталей: от простых углеродистых до сложнелегированных.

Стали для холодного деформирования. Используются для изготовления обрезных, высадочных и вытяжных штампов, волочильных досок, накатных роликов и т.д. Для штампов простой формы часто применяют углеродистые стали У10А и У12А, которые после закалки имеют высокую поверхностную твердость (HRC 62-65), но сохраняют вязкую сердцевину из-за пониженной прокаливаемости.

Крупные штампы и штампы, работающие в более тяжелых условиях эксплуатации (большая степень деформации, повышенная твердость штампуемого материала и т.д.), изготавливают из легированных сталей повышенной прокаливаемости, закаливаемых в масле или горячих средах (для минимизации деформации): Х и 7ХГ2ВМ, а иногда ШХ15.

Валки станов холодной прокатки изготавливают из хромистых сталей с 1 или 2% Cr (9Х, 9Х1). Причем из-за большого сечения они закаляются в воде, а затем подвергаются низкому отпуску при 100-1200С. После такой термообработки поверхность валка на глубину 10-15 мм имеет твердость HRC 64-66, что вместе с равномерностью карбидов обеспе-



чивает высокую эксплуатационную стойкость.

Для инструмента, деформирующего в холодном состоянии, но с ударом (клейма, инструмент для пневматических молотков, зубил и т.д.), используют легированные стали с пониженным (0,4-0,6%) содержанием углерода (ГОСТ5950-2000): 4ХС, 6ХС, 4Х2ВС, 5Х2ВС, 6Х2ВС. Эти стали закаливают с температур 860-9000С в масло и отпускают при температуре 280-4200С на твердость HRC 52-58.

Для изготовления очень крупных штампов, особенно испытывающих повышенный износ (сложные дыропробивные пуансоны и матрицы, матрицы глубокой высадки листового материала, формировочные матрицы сложных форм), используют высокохромистые стали (12%Cr при 1,0-1,5%С), обладающие высокой прокаливаемостью (до 300-400мм) и износостойкостью, повышенной теплопроводностью, малой деформируемостью: Х12М, Х12Ф1, реже Х12.

Высокое содержание хрома и углерода приводят к образованию большого количества хромистых карбидов (Cr, Fe)<sub>7</sub>С<sub>3</sub>, которые и обеспечивают высокую износостойкость. С другой стороны, карбиды (Cr, Fe)<sub>7</sub>С<sub>3</sub> обладают хорошей способностью растворяться в аустените, насыщая его хромом и повышая устойчивость к γ→α-превращению. Поэтому после закалки сохраняется большое количество остаточного аустенита (15-20%), а это обеспечивает минимум деформации.

Штампы из этих сталей закаливают с 1000-10500С (Х12М) и 1040-10700С (Х13Ф1) в масле или на воздухе и отпускают при 150-1700С на твердость 60-63 HRC.

Недостатком этих сталей является трудность их обработки резанием и карбидная неоднородность. Поэтому многие детали штампов изготавливают из стали Х6ВФ, карбидная неоднородность которой существенно ниже.

Для изготовления штампов холодной высадки, прессования и накатных инструментов применяют стали с повышенным сопротивлением пластической деформации, например 6Х6ВЗМФС.

После закалки такой стали с 1070-10900С в масло она становится устойчивой против нагрева, а это позволяет получать высокую твердость (HRC 58-62) после отпуска 540-5600С.

Стали горячего деформирования. Наиболее применяемыми сталями для молотовых штампов, подверженных ударным нагрузкам, являются стали 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНСВ, лучшей из которых является 5ХНМ, а остальные заменителями.

Термическая обработка (из-за сложности конфигурации и



большого размера изделий) очень сложная. Нагрев для закалки проводится до температур на 20-400С выше АС3 (8500С) с медленным прогревом (несколько часов). Затем осуществляется закалка в масло и длительный отпуск при 550-6000С. После такой обработки  $\sigma_B = 1200-1300\text{МПа}$ ,  $Kv=0,4-0,5\text{МДж/м}^2$ , 35-45 HRC,  $\delta=10-13\%$ , структура – сорбит отпуска.

Для штампов горячей высадки и прессования, продолжительно соприкасающихся с нагретым металлом, применяют более легированные стали 30B2B8Ф, 4X5MФ1С, 4X2B5ФМ и др., сохраняющие высокую твердость и прочность при нагреве. После закалки с 10700С в масло и отпуска при 610-6200С они имеют твердость ~HRC 45. Высокая теплостойкость этих сталей обеспечивается легированием ванадием и молибденом, которые образуют карбиды типа М6С, коагулирующие при температурах больше 6000С.

Кроме указанных сталей, для штампов, работающих при температурах 400-5000С, применяют более дешевую сталь 7ХЗ, которая обладает более высокой износостойкостью по сравнению с 5ХНМ (из-за высокого содержания углерода), но уступает ей по вязкости и красностойкости.

## 2. ЧУГУНЫ

Чугун – самый распространенный железоуглеродистый нековкий литейный материал, содержащий свыше 2% углерода, до 4,5% кремния, до 1,5% магния, до 0,18% фосфора и до 0,08% серы. В качестве конструкционного материала применяют чугуны, содержащие 3-3,5% углерода. Они хорошо обрабатываются резанием, имеют невысокий коэффициент трения, используются для изготовления подшипников скольжения.

Чугун получают в доменных печах из железных руд. Углерод в чугунах может находиться в виде карбида железа – цемента (белые чугуны) или в свободном состоянии в виде графита – частично или полностью (серые чугуны). В зависимости от формы графитовых включений и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый с пластинчатым графитом; высокопрочный с шаровидным графитом; ковкий с хлопьевидным графитом.

В состав чугунов вводят как графитизирующие элементы:



## Физическое и прикладное материаловедение

кремний, титан, никель, медь, алюминий, способствующие выделению графита, так и антиграфитизирующие: марганец, молибден, сера, хром, ванадий, вольфрам, тормозящие процесс графитизации.

Наибольшее влияние на структуру чугуна оказывает кремний, который как графитизирующий элемент способствует понижению скорости охлаждения.

Марганец образует с углеродом прочное химическое соединение. Поэтому его содержание в чугунах ограничивают. С другой стороны, марганец, соединяясь с серой, и, образуя сульфид  $MnS$ , уменьшает ее отбеливающее действие.

Сера – это вредная примесь чугуна, так как ухудшает его литейные свойства и механические характеристики. Поэтому ее содержание ограничивают 0,1%.

Фосфор оказывает благоприятное влияние на жидкотекучесть и твердость (повышает их).

Большое влияние на структуру чугуна оказывают условия затвердевания и охлаждения отливок. Быстрое охлаждение приводит к получению белого чугуна, медленное – серого. Скорость охлаждения зависит от применяемой литейной формы (песчаная или металлическая), а также от толщины стенки отливки.

### 2.1. Серые чугуны (ГОСТ1412-85)

Серые чугуны широко применяются в машиностроении. По структуре металлической основы серые чугуны могут быть перлитными, перлитно-ферритными и ферритными; графитовые включения имеют пластинчатую форму. Графит такой формы нарушает сплошность металлической основы, располагаясь между ее зернами и ослабляя связь между ними. Поэтому серый чугун плохо сопротивляется растяжению и имеет очень низкие пластичность и вязкость. Причем, чем крупнее и прямолинейнее графитовые включения, тем хуже механические свойства. Твердость и сопротивление сжатию чугуна аналогичны этим показателям для стали со схожей структурой.

Вместе с тем графитовые включения оказывают и положительное влияние на свойства чугуна, в частности, повышают его износостойкость, действуя аналогично смазке; способствуют гашению вибраций изделий; уменьшают усадку при изготовлении отливок; обеспечивают обрабатываемость резанием, являясь своеобразными стружколомами.



## Физическое и прикладное материаловедение

Механические свойства серого чугуна можно улучшить, если обеспечить равномерное распределение мелкопластинчатого графита в отливке. Это достигается модифицированием силико-кальцием или ферросилицием. Эти добавки образуют дополнительные центры графитизации, в результате чего получается мелкопластинчатый графит. Чугун с таким графитом называют модифицированным. Модифицированный чугун имеет более высокое временное сопротивление растяжению, чем обычный серый чугун, но пластичность и вязкость модифицирование практически не изменяет.

Серый чугун с пластинчатым графитом маркируется буквами СЧ, после которых стоит цифровое обозначение минимального временного сопротивления при растяжении в МПа  $\cdot 10^{-1}$  (СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35).

В зависимости от завершенности степени графитизации, количества связанного углерода (в цементите), свойств и применения серые чугуны подразделяются на следующие группы.

Перлитный чугун, в котором 0,7-0,8% С находится в виде Fe<sub>3</sub>C, входящего в состав перлита, а остальной в графитовых включениях (СЧ21, СЧ24, СЧ28, СЧ33, СЧ35, СЧ38). Перлитные серые чугуны применяют для отливки мощных станков и механизмов, поршней, цилиндров, деталей, работающих на износ в условиях больших давлений (компрессорное, арматурное и турбинное литье, блоки двигателей, детали металлургического оборудования и т.д.). Структура таких чугунов – мелкопластинчатый перлит (сорбит) с мелкими завихренными графитовыми включениями.

Ферритно-перлитный и ферритный серый чугун. В ферритно-перлитном чугуне в связанном состоянии находится 0,1-0,7% углерода, в ферритном чугуне весь углерод находится в графитовых включениях (СЧ00, СЧ12, СЧ15, СЧ18).

В процессе эксплуатации чугунов этой группы применяют небольшие нагрузки (строительные колонны, фундаментные плиты (СЧ12); литые малонагруженные детали сельхозмашин, станков, автомобилей и тракторов (СЧ15, СЧ18); крышки, корпуса редукторов, диски сцепления, тормозные барабаны и т.д.).

Все эти чугуны для снятия литейных напряжений и стабилизации размеров отливок отжигают в течение 3-10 ч (в зависимости от размеров) при температуре 500-5700С с последующим охлаждением вместе с печью. Иногда для снижения напряжений в чугунных отливках применяют естественное старение – выдержку на складе в течение 6-10 месяцев, при этом напряжения снижа-



ются на 40-50%.

Еще одной группой серых чугунов являются антифрикционные чугуны, которые применяют для изготовления подшипников скольжения, втулок и других деталей, работающих в условиях трения о металл, чаще в присутствии смазки. Эти чугуны должны иметь низкий коэффициент трения. Антифрикционные свойства чугуна обеспечиваются определенным соотношением феррита и перлита в основе. Они изготавливаются следующих марок: АСЧ-1, АСЧ-2, АСЧ-3.

Детали, работающие в паре с закаленными или нормализованными стальными валами, изготавливают из чугунов АСЧ-1 и АСЧ-2, содержащих до 85% перлита, а при работе в паре с термически не обработанными валами применяют чугун АСЧ-3, в металлической основе которого не менее 60% перлита.

## **2.2. Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом (ГОСТ 7283-85)**

Получают присадкой в жидкий чугун (модифицированием) небольших добавок щелочных или щелочноземельных металлов, чаще всего магния или церия (0,03-0,07%). По содержанию остальных элементов высокопрочные чугуны не отличаются от обычного серого, из которого их и получают. Под воздействием модификаторов графит в процессе кристаллизации принимает шаровидную форму. Такая форма включений имеет минимальную поверхность при данном объеме и значительно меньше ослабляет металлическую основу чугуна, чем пластинчатый графит. Включения графита шаровидной формы не являются активными концентраторами напряжений, и поэтому высокопрочные чугуны имеют более высокие механические свойства, чем серые, и не уступают литой углеродистой стали.

Маркируется высокопрочный чугун буквами ВЧ, после которых стоит числовое обозначение  $\sigma_B$  при растяжении (ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100). Чугуны ВЧ35 и ВЧ40 имеют ферритную матрицу, ВЧ45 – ферритно-перлитную, а остальные перлитную металлическую основу.

Отливки из высокопрочного чугуна применяют в различных отраслях. В автомобилестроении и дизелестроении высокопрочный чугун используют для изготовления коленчатых валов, крышек цилиндров и других деталей; в тяжелом машиностроении – для прокатных станов (в том числе валков до 12 т) и кузнечно-



го-прессового оборудования (траверсы прессов, шабот – молоты); в энергетическом машиностроении – для корпусов паровых турбин, коленчатых валов, поршней и т.д.; в химической и нефтяной промышленности для корпусов насосов, вентилей и т.д.

### 2.3. Ковкие чугуны (ГОСТ 1215-79)

Ковкий чугун получают длительным нагревом при высоких температурах (отжигом) отливок из белого чугуна. В результате отжига образуется графит хлопьевидной формы. Такой графит по сравнению с пластинчатым меньше снижает прочность и пластичность металлической основы структуры чугуна. Металлическая основа ковкого чугуна: феррит — ковкий ферритный чугун и реже перлит — перлитный ковкий. Наибольшей пластичностью обладает ковкий ферритный чугун, который применяют в машиностроении.

Химический состав белого чугуна, отжигаемого на ковкий чугун, выбирают в пределах: 2,5-3,0% С; 0,7-1,5% Si; 0,3-1,0% Mn;  $\leq 0,12\%$  S и  $\leq 0,18\%$  P (в зависимости от требуемой структуры металлической основы). Чугун имеет пониженное содержание углерода и кремния. Более низкое содержание углерода способствует повышению пластичности, так как при этом уменьшается количество графита, выделяющегося при отжиге, а пониженное содержание кремния исключает выделение пластинчатого графита в структуре отливок при охлаждении.

Толщина сечения отливки не должна превышать 40-50 мм. При большем размере отливок в сердцевине образуется пластинчатый графит, и чугун становится непригодным для отжига.

Отжиг проводят в две стадии: первоначально отливки (чаще упакованные в ящики с песком) выдерживают при 950-970<sup>0</sup>С. В этот период протекает I стадия графитизации цементита, входящего в состав ледебурита (A+Fe<sub>3</sub>C), установление стабильного равновесия аустенит-графит. В результате распада цементита диффузионным путем образуется хлопьевидный графит (углерод отжига).

Затем отливки охлаждают до температур, соответствующих интервалу эвтектоидного превращения. При охлаждении происходит выделение из аустенита вторичного цементита, его распад и в итоге рост графитовых включений. При достижении эвтектоидного интервала температур охлаждение резко замедляется или дают длительную выдержку при температуре несколько



ниже этого интервала. В этот период протекает II стадия графитизации: распад аустенита с образованием ферритно-графитной структуры и распад цементита, входящего в состав структуры перлита, с образованием феррита и графита (в процессе выдержки ниже эвтектоидной температуры). После окончания II стадии графитизации структура чугуна состоит из феррита и хлопьевидного графита.

Излом ферритного чугуна бархатисто-черный вследствие большого количества графита. Если не проводить выдержку ниже эвтектоидной температуры (или если в этом интервале температур скорость охлаждения повышенная), то образуется ковкий перлитный чугун (П + Г), имеющий светлый (сталистый) излом.

Для ускорения отжига применяют различные меры: чугун модифицируют алюминием (реже бором, висмутом и другими элементами), повышают температуру нагрева чугуна перед разливкой, применяют перед отжигом старение. Чаще в процессе нагрева до температуры отжига повышают температуру I стадии графитизации (но не выше  $1080^{\circ}\text{C}$ ) или же выполняют отжиг в защитной атмосфере. В этом случае длительность отжига составляет 24-60 ч.

Ковкий чугун маркируют буквами КЧ и цифрами. Первые две цифры указывают временное сопротивление при растяжении, а вторые - относительное удлинение. Отливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках. Например, ковкий ферритный чугун марок КЧ 37-12 и КЧ 35-10 используют для изделий, эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках (картеры редукторов, задний мост, ступицы, крюки, скобы и т.д.); для менее ответственных изделий (головки, хомутики, гайки, глушители, фланцы, муфты и т.д.) применяют ферритный чугун марок КЧ30-6 и КЧ33-8. Твердость ферритного чугуна составляет HB163. Ковкий перлитный чугун КЧ50-5, КЧ56-4, КЧ60-3 и КЧ63-2 обладает высокой прочностью, умеренной пластичностью; твердость перлитного чугуна составляет HB269. Из ковкого перлитного чугуна изготавливают вилки карданных валов, звенья и ролики цепей конвейера, втулки, муфты, тормозные колодки и т.д. Главным образом ковкий чугун применяют для тонкостенных деталей в отличие от высокопрочного магниевого чугуна, который используют для деталей большого сечения.



## 2.4. Высокопрочный чугун с вермикулярным графитом

Это чугун, который обладает такими же литейными свойствами, демпфирующей способностью и теплопроводностью, как и серый чугун, а прочностные характеристики его сопоставимы с отдельными марками высокопрочного чугуна с шаровидным графитом ( $\sigma_B=300-450\text{МПа}$ ). Используется он для изготовления ответственных литых деталей машин, работающих в условиях циклических нагрузок.

Получение вермикулярной формы графита в чугунах осуществляется различными методами, основанными главным образом на использовании модификаторов, например, обработкой расплава малыми добавками магния (0,01-0,04%) в сочетании с присадками титана (0,2-0,5%) и церия (0,001-0,01%) с помощью специально разработанной комплексной лигатуры Fe-Si-Mg-Ca.

Вермикулярная (червеобразная) форма графита в соответствии с ГОСТ 3443-87 обозначается эталонами ВГф1, ВГф2, ВГф3. Графит ВГф1 образуется в тонкостенной отливке и на быстроохлаждаемых участках. Для него характерно прерывистое строение включений графита с сохранением определенной направленности и распределения.

Форма графита ВГф2 образуется преимущественно в чугуне с ферритной металлической основой. Для нее характерны равномерное расположение включений, имеющих извилистый и сходный характер.

Форма графита ВГф3 характерна для низколегированных чугунов с перлитной матрицей. Это самые большие по толщине включения, отличающиеся разнообразием как размеров, так и очертаний. В ГОСТ 28394-89 для изготовления отливок предусмотрены 4 марки ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40, ЧВГ45, в которых цифра – это  $\sigma_B$  [ $\text{МПа} \cdot 10^{-1}$ ].

Чугуны с вермикулярным графитом имеют скорость изнашивания при установившемся режиме несколько более высокую, чем ВЧ, но меньшую чем СЧ.

Термостойкость при термоциклировании 20-450<sup>0</sup>С (характерного для условия работы дизельных двигателей), т.е. время возникновения и распространения трещин около графитовых включений у этих чугунов аналогична термостойкости ВЧ, но выше, чем у СЧ.

Используется чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ30,



ЧВГ35, ЧВГ40) для изготовления деталей двигателей внутреннего сгорания, работающих при переменных и повышенных температурах и механических нагрузках (головки цилиндров); для автомобилей повышенной грузоподъемности (тормозные рычаги для тракторов, крышки коробок передач, тормозные диски для скоростных поездов, изложницы, поддонов и др.).

### 3. ТИТАН И ЕГО СПЛАВЫ

Титан как металл по распространенности в земной коре занимает четвертое место, уступая алюминию, железу и магнию. Преимущественно титан используется в авиации, ракетостроении и других отраслях техники, где удельная прочность имеет важное значение.

Титан – серебристо-белый металл с малой плотностью  $4,5 \text{ г/см}^3$  и высокой температурой плавления  $1672^\circ\text{C}$ . Он имеет две полиморфные модификации: низкотемпературную  $\alpha$  с ГПУ-решеткой и высокотемпературную  $\beta$  с ОЦК-решеткой. Температуру перехода  $\alpha \leftrightarrow \beta$   $882^\circ\text{C}$ . Metallургические заводы изготавливают титановую губку, которую затем переплавляют на машиностроительных предприятиях, получая технический титан, изготавливаемый трех марок: ВТ1-00 (99,53%Ti); ВТ1-0 (99,48%Ti) и ВТ1 (99,44%Ti).

Вредными примесями для титана являются азот, углерод, кислород, водород, образующие с ним твердый раствор внедрения и хрупкие оксиды, карбиды, нитриты и гидриды, которые понижают пластичность, ухудшают свариваемость, увеличивают твердость и прочность, понижают сопротивление коррозии. Для сравнения чистый титан имеет  $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 70\%$ , а технический титан  $\sigma_B = 330-550 \text{ МПа}$  и  $\delta = 20-30\%$ .

Кроме этого на поверхности титана легко образуется стойкая оксидная пленка, обеспечивающая высокую коррозионную стойкость в пресной и морской воде, а также в некоторых кислотах. Титан устойчив также против кавитации и коррозии под напряжением.

Технический титан обладает рядом хороших технологических свойств: хорошо обрабатывается давлением и сваривается, но при этом плохо обрабатывается резанием.

**Сплавы на основе титана.** Для получения сплавов ти-



## Физическое и прикладное материаловедение

тан легируют алюминием, молибденом, ванадием, марганцем, хромом, оловом, железом, ниобием, кремнием. Легирование титана осуществляют для улучшения механических свойств (повышения  $\sigma_B$  и снижения  $\delta$ ).

Легирующие элементы существенно влияют на температуру полиморфного превращения: алюминий, кислород, углерод повышают ее и расширяют  $\alpha$ -область; их называют  $\alpha$ -стабилизаторами; молибден, вольфрам, марганец, хром, железо понижают температуру полиморфного превращения и расширяют  $\beta$ -область, их называют  $\beta$ -стабилизаторами; олово, цинк не изменяют температуру полиморфизма. Все промышленные сплавы титана содержат от 3 до 8 % алюминия, являющегося  $\alpha$ -стабилизатором.

Легированием элементами, являющимися  $\beta$ -стабилизаторами, можно получать различные по структуре сплавы:  $\alpha$ -сплавы (например, BT5, BT5-1, BT4), легируемые главным образом алюминием;  $\alpha+\beta$ -сплавы (BT6, BT8, BT14), в которых кроме алюминия добавляют 2-4%  $\beta$ -стабилизаторов (хром, молибден, железо, ванадий и др.);  $\beta$ -сплавы (BT15, BT22), в которых количество  $\beta$ -стабилизаторов составляет до 10%. Наибольшее применение получили  $\alpha$ - и  $\alpha+\beta$ -сплавы.

Титановые сплавы в зависимости от их состава и назначения можно подвергать закалке, старению, отжигу, химико-термической обработке, хотя основным способом упрочнения является легирование.

Технический титан и  $\alpha$ -сплавы титана подвергают рекристаллизационному отжигу при 750-780<sup>o</sup>C. Для  $\alpha+\beta$ -сплавов титана применяют изотермический отжиг при 850-950<sup>o</sup>C (в зависимости от химического состава) с последующим охлаждением на воздухе до 500-650<sup>o</sup>C;  $\alpha+\beta$ -сплавы могут быть упрочнены (хоть и незначительно) закалкой с последующим старением. При закалке этих сплавов протекает мартенситное превращение с образованием игольчатой (пластинчатой) мартенситной структуры  $\alpha$  – фазы, которая имеет искаженную структуру.

При высокой концентрации легирующих элементов после закалки возникает мартенситная  $\alpha$  – фаза с ромбической решеткой и  $\omega$  – фаза с гексагональной структурой. Причем, если  $\alpha$  – фаза увеличивает пластичность, то  $\omega$  – фаза охрупчивает сплав. При последующем старении происходит распад фаз, что приводит к небольшому упрочнению титановых сплавов.

В ряде случаев сплавы титана подвергают азотированию в



## Физическое и прикладное материаловедение

течение 30-60 ч при 850-950<sup>0</sup>С в атмосфере азота. Толщина диффузионного слоя при этом колеблется от 0,05 до 0.15мм (HV750-900). Другие виды ХТО практически не применяют.

Из титановых сплавов изготавливают обшивки самолетов, диски и лопатки компрессоров, крепежные детали, корпуса двигателей второй и третьей ступеней космических кораблей, сопла, химическое оборудование, контактирующее с влажным хлором, азотной кислотой, гребные винты и обшивки морских судов, подводных лодок, торпед и т.д.

## 4. ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ И ИХ СПЛАВЫ

Тугоплавкими называют металлы, имеющие температуру плавления выше, чем у железа. Наибольшее значение в технике имеют ниобий ( $T_{пл}=2415^0\text{C}$ ), молибден ( $T_{пл}=2625^0\text{C}$ ), хром ( $T_{пл}=1875^0\text{C}$ ), тантал ( $T_{пл}=2996^0\text{C}$ ), вольфрам ( $T_{пл}=3410^0\text{C}$ ), рений ( $T_{пл}=3180^0\text{C}$ ). Все эти металлы получают в виде компактной массы либо методом дуговой плавки, либо методом порошковой металлургии.

Тугоплавкие металлы и сплавы на их основе используются главным образом как жаропрочные при создании ракет и космических кораблей, атомных реактивов, отдельных узлов энергетических установок, работающих при температурах 1500-2000<sup>0</sup>С. Кроме того, молибден и вольфрам в чистом виде используют в электротехнической, радио- и электронной промышленности (нити накаливания, листовые аноды, сетки, пружины катодов, нагреватели). Жаропрочность чистых металлов существенно ниже, чем у сплавов. Однако пластичность чистых тугоплавких металлов выше, чем у сплавов.

В качестве легирующих элементов используются как сами тугоплавкие металлы с образованием неограниченных твердых растворов (кроме системы Ta-Cr), так и другие элементы с образованием ограниченных твердых растворов. Образование твердых растворов приводит к твердорастворному упрочнению, которое снижает пластичность.

Сильное влияние на тугоплавкие металлы оказывают элементы с малыми атомными радиусами (N, C, O, H), образующие твердые растворы внедрения, изменяющие с температурой растворимость. Последнее обстоятельство создает возможность термообработки с регулированием растворения и выделения оксид-



ных, карбидных, нитридных фаз, которые упрочняют сплавы, но при этом повышают хрупкость (хладноломкость).

Все тугоплавкие металлы и сплавы на их основе имеют низкую жаропрочность (ниже 600-800<sup>0</sup>С). Для повышения этой характеристики создают металлические, интерметаллические и керамические покрытия. Например, для молибдена и вольфрама лучшими считаются силицидные покрытия MoSi<sub>2</sub>, WSi<sub>2</sub>.

С другой стороны, тугоплавкие металлы являются чрезвычайно кислотостойкими (особенно тантал и сплавы Ta-Nb) при взаимодействии даже с такой чрезвычайно агрессивной средой, как кипящая серная кислота.

## 5. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

К цветным относятся металлы с плотностью менее 3г/см<sup>3</sup> (алюминий, магний, бериллий, медь), исключая щелочноземельные металлы; наиболее широко применяется алюминий, главным образом из-за невысокой стоимости, больших запасов (третье место после кислорода и кремния).

### 5.1. Алюминий и его сплавы

Алюминий – металл серебристого цвета с плотностью 2,7 г/см<sup>3</sup> (против 7,8 г/см<sup>3</sup> у железа и 9г/см<sup>3</sup> у меди). Обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, низкой температурой плавления (658<sup>0</sup>С), высокой теплотой плавления, низким  $\sigma_B$  (до 90 МПа), высокой пластичностью ( $\delta$  до 45%).

Производство алюминиевых сплавов – сложный технологический процесс. Его получают из минералов: бокситов, нефелинов, алунитов. При этом сначала получают глинозем, а затем путем электролиза алюминиевый сплав. Для производства требуется большое количество электроэнергии, и поэтому алюминиевые заводы находятся рядом с мощными электростанциями. Достаточно сказать, что первый алюминиевый завод в России был запущен только в 1932 году на базе Волховской ГЭС.

В зависимости от чистоты различают (ГОСТ 11069-74):

- алюминий особой чистоты А999 (99,999% Al);
- алюминий высокой чистоты А995 (99,995% алюминия),



## Физическое и прикладное материаловедение

A99 (99,99% алюминия), A97 (99,97% алюминия), A95 (99,95% алюминия);

- алюминий технической чистоты A85, A8, A7, A6, A5, A0 (99,0% алюминия).

Основными примесями (постоянными) являются железо и кремний. Причем железо практически нерастворимо в алюминии и участвует в образовании эвтектики  $Al+Al_3Fe$ , располагающейся по границам зерен. Кремний не образует с алюминием химических соединений и поэтому в эвтектику входит в чистом виде.

Технический алюминий поставляется в виде листов, профилей прутков, проволоки, фольги и других полуфабрикатов и маркируется АД00 (99,7 Al), АД0 (99,5 Al), АД1 (99,3 Al), АД (98,8% Al). Применять его в качестве конструкционного материала нецелесообразно из-за низкой прочности, но такие его свойства, как высокие пластичность, коррозионная стойкость, электропроводность и хорошая свариваемость позволяют широко применять технический алюминий для элементов конструкций и деталей, не несущих нагрузки (трубопроводы, палубные надстройки судов, кабели, электропровода, витражи, рамы, посуда, цистерны для молока, фольга и т.д.).

Из сплавов на основе алюминия наибольшее распространение получили системы: Al-Cu, Al-Mg, Al-Si, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si, Al-Zn-Mg-Cu. В равновесном состоянии эти сплавы представляют собой низколегированный твердый раствор и интерметаллидные фазы:  $\theta$  – фаза ( $CuAl_2$ );  $Mg_2Si$ ; S – фаза ( $Al_2CuMg$ ); T – фаза ( $Al_6CuMg_4$ );  $Al_3Mg_2$  и т.д. Алюминиевые сплавы можно разделить на три группы:

1. Деформируемые сплавы, которые способны упрочняться термической обработкой. Они в свою очередь делятся на сплавы не упрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

2. Литейные сплавы, предназначенные для фасонного литья.

3. Сплавы, получаемые порошковой металлургией (САП – спеченные алюминиевые порошки, САС – спеченные алюминиевые сплавы).

**Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой.** Наиболее распространенный алюминиевый сплав, упрочняемый термической обработкой, – это *дуралюмин*. Дуралюмины – это сплавы Al-Cu-Mg, в которые дополнительно вводят марганец. Типичным дуралюмином является сплав Д1, содержащий 3,8-4,8% меди, 0,4-0,8% магния, 0,4-0,8% марганца, а также постоянные приме-



си кремния и железа меньше 0,7%. Однако производство его постоянно сокращается из-за сравнительно низких механических свойств. Вместо него все чаще (особенно для профилей) используется сплав Д16 с более высоким содержанием Mg (1,2-1,8%).

Дуралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием и хорошо свариваются точечной сваркой.

Применяют дуралюмины для изготовления деталей и элементов конструкций средней и повышенной прочности ( $\sigma_B = 410-490$  МПа у Д1 и  $\sigma_B = 440-540$  МПа у Д16 в состаренном состоянии), требующих долговечность при переменных нагрузках; в строительных конструкциях, не требующих высокой коррозионной стойкости; в самолетостроении (обшивки, шпангоуты, стрингеры и лонжероны самолетов) и т.д.

Дуралюмин, изготавливаемый в листах, для защиты от коррозии подвергают плакированию (покрытию тонким слоем алюминия высокой чистоты). Однако прочность при этом снижается на 80 МПа.

Упрочнение дуралюминов осуществляется закалкой и старением. В исходном (отожженном) состоянии структура дуралюмина – твердый раствор, вторичные включения интерметаллических соединений –  $\text{CuAl}_2$ , S – фаза ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ),  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и нерастворимых соединений  $\text{Mn}-(\text{Mn}, \text{Fe})\text{Al}_6$ .

Для закалки дуралюмины нагревают до  $505^\circ\text{C}$  (Д16) и  $510^\circ\text{C}$  (Д1) (выше нельзя из-за пережога) и закаливают в воду. В процессе нагрева под закалку избыточные фазы практически полностью растворяются в алюминий. Быстрое последующее охлаждение (в воде) приводит к образованию пересыщенного твердого раствора, обладающего невысокой прочностью, но высокой пластичностью.

Окончательной операцией термообработки дуралюминов является старение, которое может быть естественным (при комнатной температуре до 7 суток) и искусственным (до 24 часов при повышенной температуре).

В процессе старения происходит распад пересыщенного раствора, что сопровождается упрочнением. Этот распад происходит в несколько стадий в зависимости от температуры и продолжительности старения. При естественном старении ( $20^\circ\text{C}$ ) или при искусственном старении с нагревом меньше  $150^\circ\text{C}$  происходит зонное старение, при котором атомы меди, имеющие  $R_{\text{ат}}$  меньший, чем у Al, перемещаются внутри решетки  $\alpha$  – твердого раствора и концентрируются в определенных местах, образуя двумерные пластинчатые, дискообразные области, толщиной в несколько



## Физическое и прикладное материаловедение

атомных слоев и протяженностью 30-60А – зоны Гинье – Престона (ГП-1). Причем концентрация Cu в ГП-1 составляет ~54% от ее концентрации в интерметаллиде  $\text{CuAl}_2$ .

Дальнейшая выдержка приводит к укрупнению зон ГП как по толщине (10-40А), так и по протяженности (200-300А), а также к повышению концентрации меди в них до значений, соответствующих  $\text{CuAl}_2$ . Такие зоны принято называть зонами ГП-2. Следует отметить, что при естественном старении происходит только зонное старение с образованием зон Гинье-Престона.

При искусственном старении дальнейшая выдержка или повышение температуры приводит к образованию в местах расположения зон ГП-2 дисперсных частиц промежуточной  $\Theta'$  - фазы. Эта фаза не отличается по химическому составу от стабильной  $\Theta$  ( $\text{CuAl}_2$ )-фазы, когерентно связана с  $\alpha$ -твердым раствором, но имеет отличную от  $\Theta$ -фазы кристаллическую решетку. При дальнейшей выдержке или повышении температуры  $\Theta'$  - фаза превращается в стабильную  $\Theta$  - фазу с коагуляцией последней. Процессы образования  $\Theta'$  - фазы и  $\Theta$  - фазы называют фазовым старением. В результате старения прочностные характеристики дуралюмина возрастают примерно вдвое, а пластические понижаются на 25-35%.

**Сплавы авиаль.** Это сплавы с содержанием Cu (0,1-0,5%), Mg (0,45-0,90%), Mn или Cr (0,15-0,35%) и Si (0,5-1, 2%). Они уступают по прочности дуралюмину в 2 раза, но превосходят его по пластичности как в холодном, так и в горячем состоянии.

Авиали обладают высоким пределом выносливости, хорошо сопротивляются коррозии, удовлетворительно свариваются аргонодуговой и контактной сваркой.

Авиали поставляются в виде листов, труб и других полуфабрикатов, используемых для элементов конструкций, несущих умеренные нагрузки. Из них изготавливают лопасти винтов вертолетов, кованые детали двигателей, рамы, двери и т.д.

Авиали упрочняются закалкой и старением. Упрочняющей фазой у них является соединение  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Закалка производится с нагревом до 515-525 $^{\circ}\text{C}$  и охлаждением в воду. Старение осуществляют либо при 20 $^{\circ}\text{C}$  в течение 4-5 суток, либо при 160 $^{\circ}\text{C}$  в течение 12 ч. Процессы, протекающие при термообработке, аналогичны дуралюмину.

Высокопрочные алюминиевые сплавы. К ним относятся алюминиевые сплавы, в которые кроме обычных присадок (Cu и Mg) вводят еще и цинк (В95-5,7% Zn, В96-7,6-8,6%Zn). Проч-



## Физическое и прикладное материаловедение

ность этих сплавов достигает  $\sigma_B=550-700$  МПа, но при меньшей пластичности ( $\delta=7-8\%$ ), чем у дуралюмина. Эти сплавы обладают пониженной коррозионной стойкостью, однако, в ряде случаев это устраняется присадками хрома и цинка (0,1-0,25%). У них меньше, чем у дуралюмина, предел выносливости и сопротивляемость повторным статистическим нагрузкам; они обладают большей чувствительностью к концентраторам напряжений.

Сплавы В95 и В96 хорошо обрабатываются резанием и свариваются точечной сваркой. Их применяют в самолетостроении для нагруженных конструкций, работающих длительное время при температурах меньше  $100-120^\circ\text{C}$  (обшивки, стрингеры, лонжероны и т.д.), для силовых каркасов строительных сооружений и т.д.

Упрочняющими фазами у высокопрочных алюминиевых сплавов являются Т- фаза ( $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ ), S – фаза ( $\text{Al}_3\text{CuMg}$ ) и  $\text{MgZn}_2$ .

Высокое легирование снижает температуру начала плавления. Поэтому В95 и В96 имеют более низкую температуру закали, чем дуралюмины и авиали –  $460-470^\circ\text{C}$ . Другой особенностью закали является использование в качестве охлаждающей среды подогретую до  $80-100^\circ\text{C}$  воду, так как скорость распада высоколегированного твердого раствора меньше, чем твердого раствора Cu-Al.

И, наконец, естественное старение не дает максимальной прочности, и поэтому применяют искусственное старение при температуре  $120-140^\circ\text{C}$  в течение 16-24 ч.

### **Алюминиевые сплавы дляковки и штамповки.**

Сплавы этого типа отличаются высокой пластичностью при температурахковки и штамповки ( $380-450^\circ\text{C}$ ) и удовлетворительными литейными свойствами, позволяющими получать качественные слитки. Их используют для деталей сложной формы и средней прочности ( $\sigma_B$  до 500МПа) – подmotorные рамы, крыльчатки, фитинги, лопасти винтов вертолетов, бандаживагонов и т.д. Упрочняющими фазами у этих сплавов являются соединения  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , S – фаза,  $\text{CuAl}_2$  W – фаза ( $\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{Cu}_5\text{Si}_4$ ).

Например, химический состав сплава АК6: медь – 1,8-2,6%; магний – 0,4-0,8%; марганец – 0,4-0,8%; кремний – 0,7-1,2%, остальное алюминий. Его закаливают с  $505-525^\circ\text{C}$ , а АК8 с  $495-505^\circ\text{C}$  в воду с обязательной более продолжительной выдержкой при нагреве (из-за грубой вторичной фазы). После закали алюминиевые сплавы дляковки подвергают искус-



ственному старению при 150-165<sup>0</sup>С в течение 6-15 ч.

*Жаропрочные алюминиевые сплавы* (АК41, Д20). Эти сплавы используют для изготовления деталей, работающих при температурах до 300<sup>0</sup>С (поршни, головки цилиндров, лопатки и диски осевых компрессоров активных турбореактивных двигателей, обшивки сверхзвуковых самолетов и т.д.).

Для получения жаропрочного состояния алюминиевые сплавы этой группы легируют дополнительно железом, никелем (0,8-1,3%) и титаном (0,1-0,2%), которые замедляют диффузионные процессы и тормозят процесс разупрочнения при высокой температуре. Фазами-упрочнителями жаропрочных сплавов алюминия – являются  $\theta$ -фаза ( $\text{CuAl}_2$ ),  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , S-фаза ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ), а также  $\text{Al}_9\text{FeNi}$  и  $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ , которые выделяются при частичном распаде твердого раствора в виде дисперсных частиц, устойчивых к коагуляции.

Наибольшей жаропрочностью обладает сплав Д20, который используется для деталей, работающих длительное время при температуре 250-350<sup>0</sup>С.

Сплавы АК4-1 закалывают при 510-515<sup>0</sup>С, а Д20 при 535<sup>0</sup>С в воде и подвергают искусственному старению при 165-175<sup>0</sup>С в течение 15-20 ч.

**Деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термической обработкой.** К этой группе относятся сплавы:

АМц-сплавы системы Al-Mn (1-1,6% Mn), АМг – сплавы системы Al-Mg. Они характеризуются сравнительно невысокой прочностью ( $\gamma$  АМц  $\sigma_B=130-170$  МПа,  $\gamma$  АМг6 – 300 МПа), высокой пластичностью ( $\delta=23\%$  у АМц и  $\delta=20\%$  у АМг6) и коррозионной стойкостью.

Сплав АМц представляет собой твердый раствор магния в алюминии, в котором в небольшом количестве присутствуют частицы соединения  $\text{Al}_6\text{Mn}$ . Сплавы АМг даже после медленного охлаждения не содержат избыточных фаз и состоят только из  $\alpha$ -твердого раствора магния в алюминии. Термическую обработку (закалку и старение) не применяют, так как эффекта от ее применения практически нет.

Сплавы применяют в отожженном состоянии. Сплавы АМц и АМг легко штампуются, гнутся, хорошо свариваются аргонодуговой и контактной сваркой.

Областью их применения являются элементы конструкций, испытывающие сравнительно небольшие нагрузки и требующие высокого сопротивления коррозии (баки для бензина, палубные надстройки морских и речных судов, двери, оконные



рамы и другие.)

Сплавы АМг5 и АМг6 используют для средненагруженных деталей и конструкций (рамы и кузова вагонов, нагруженные потолки, электромагниты, мачты судов и корпуса, лифты и т.д.).

**Литейные алюминиевые сплавы.** Сплавы алюминия фасонного литья должны обладать высокой жидкотекучестью, сравнительно небольшой усадкой, малой склонностью к образованию горячих трещин, а также прочностью в сочетании с хорошими механическими свойствами, сопротивлением коррозии.

Высокими литейными свойствами обладают сплавы, содержащие эвтектику в структуре. Поэтому содержание легирующих элементов в литейных сплавах алюминия выше, чем в деформируемых. В настоящее время применяют сплавы следующих систем: Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, т.е. систем с узким интервалом кристаллизации.

Однако у систем Al-Cu, Al-Mg механические свойства сплавов эвтектической концентрации неудовлетворительны и поэтому такие сплавы (по химическому составу близкие к эвтектической) применяются редко.

Исключение составляет система Al-Si, сплавы которой получили название силуминов. Эвтектика в этой системе имеет сравнительно низкое содержание кремния (11,6%), в то время как в системе Al-Cu эвтектика содержит 33%Cu, а в системе Al-Mg 34,5% Mg. Поэтому силумины обладают достаточно высокими механическими свойствами особенно после модифицирования.

Маркируются литейные алюминиевые сплавы буквами АЛ, после которых ставится цифра, обозначающая порядковый номер сплава по ГОСТ 1583-93: АЛ1, АЛ2, АЛ3, АЛ4.....АЛ9, АЛ11, АЛ12. Сплав АЛ2 является типичным силумином, содержащим 10-13% кремния. Структура его представляет собой грубую игольчатую эвтектику Al-Si и включения первичного кремния. Механические свойства АЛ2 с такой структурой  $\sigma_B = 140$  МПа,  $\delta = 3\%$ .

Для получения необходимых механических свойств технической силумин АЛ2 модифицируют незначительным (0,01%) количеством натрия в виде смеси  $2/3 \text{ NaF} + 1/3 \text{ NaCl}$ . Модифицирование понижает температуру эвтектического превращения и смещает вправо концентрацию эвтектического сплава, т.е. сплав АЛ2 с концентрацией кремния 10-13% становится доэвтектическим со структурой – первичные выделения алюминия и мелкозернистая эвтектика. Измельчение эвтектики при модифицировании объясняется образованием силицида натрия ( $\text{Na}_2\text{Si}$ ), который «обвола-



квивает» кристаллы кремния и затрудняет их рост. Отсутствие первичных выделений кремния и более мелкая структура эвтектики позволяют повысить  $\sigma_B$  до 180 МПа, а  $\delta$  до 8%.

При более высоких требованиях к прочностным свойствам применяют специальные доэвтектические силумины с 4-10% кремния и добавками меди, магния, марганца (АЛ3, АЛ4, АЛ5, АЛ6, АЛ9).

При добавлении магния в сплавы Al-Si образуется соединение  $Mg_2Si$ , и сплав приобретает способность упрочняться при термической обработке. К таким сплавам относятся специальные силумины АЛ4 и АЛ9, которые содержат несколько пониженное (по сравнению с АЛ2) количество кремния, соответственно 8,0-10,5% и 6,0-8,0%, а также 0,2-0,4% магния и до 0,5% марганца. Повышенное содержание марганца позволяет уменьшить вредное влияние железа, понижающего пластичность сплавов.

Силумины АЛ4 и АЛ9 обладают хорошими литейными и механическими свойствами, например, АЛ4 после модифицирования, закалки с  $535^{\circ}C$  в горячей ( $50-100^{\circ}C$ ) воде и старения при  $175^{\circ}C$  в течение 15 ч имеет  $\sigma_B = 260$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 200$  МПа,  $\delta = 4\%$ .

Сплавы АЛ4 и АЛ9 применяют для изготовления крупных и средних деталей, испытывающих большие нагрузки, а также деталей, работающих при температурах до  $200^{\circ}C$  (например, головки цилиндров двигателей жидкостного охлаждения).

Силумины АЛ3, АЛ5, АЛ6 – низкокремнистые (4,0-6,0%) сплавы, дополнительно легированные медью (от 1,5 до 3,5%), а также марганцем и магнием в небольших (до 0,5-0,8%) количествах. Они обладают худшими литейными, но лучшими механическими свойствами по сравнению с АЛ2.

И, наконец, последний из силуминов АЛ11 – цинковистый силумин, в который вводят 6,0-8,0% кремния и от 10 до 14% цинка, который существенно улучшает литейные свойства. Сплав АЛ11 используют при изготовлении особо сложных отливок.

Силумины хорошо сопротивляются коррозии во влажной атмосфере и морской среде, удовлетворительно обрабатываются резанием, обеспечивают герметичность отливок, свариваются газовой и аргонодуговой сваркой. К их недостаткам можно отнести склонность к образованию газовой порочности в крупных отливках.

Остальные сплавы на основе алюминия не содержат кремний как присадку и к силуминам не относятся. Сплавы системы Al-Cu АЛ12 и АЛ7 существенно различаются между собой не



только содержанием меди (у АЛ7 – 4-5%, а у АЛ12 – 9-11%), но и механическими и технологическими свойствами после закалки и старения.

Для изготовления литых деталей, длительно работающих при 275-320<sup>0</sup>С (поршни, головки цилиндров, детали реактивных двигателей и т.д.), применяют сплавы, содержащие в качестве упрочняющих фаз  $Al_6Cu_5Ni$ ,  $Al_3(Cu, Ni)_2$  и другие. Эти фазы обладают малой склонностью к коагуляции и образуют дисперсные разветвленные выделения, блокирующие зерна твердого раствора. Так, в качестве жаропрочного сплава широко используют сплав АЛ1 (3,75-4,5% Cu; 1,25-1,75% Mg; 1,75-2,25% Ni). Сплав обладает удовлетворительными литейными свойствами, хорошей свариваемостью и обрабатываемостью резанием, но пониженной герметичностью и коррозионной стойкостью. После закалки с 515<sup>0</sup>С и старения при 220<sup>0</sup>С механические свойства после нагрева в течение 100 ч при температуре испытания 250<sup>0</sup>С составляют  $\sigma_B = 160$  МПа и  $\delta = 2\%$ , а при 300<sup>0</sup>С  $\sigma_B = 130$  МПа и  $\delta = 6\%$ .

Для литых деталей, несущих высокие нагрузки и подверженных действию морской и воздушной атмосферы, применяют коррозионно-стойкий сплав АЛ8, содержащий 9,5-11,5% магния. После закалки с 430<sup>0</sup>С сплав представляет собой однородный твердый раствор магния в алюминии, что предопределяет его высокую коррозионную стойкость. Временное сопротивление растяжению сплава АЛ8 составляет 300 МПа, относительное удлинение 10-11%. Сплавы алюминия с магнием хорошо обрабатываются резанием, свариваются, но имеют пониженные литейные свойства. В расплавленном состоянии сплав легко окисляется. Для уменьшения окисления в него вводят 0,05-0,07% бериллия, а для измельчения зерна такое же количество титана.

В отдельную группу можно выделить антифрикционные алюминиевые сплавы (ГОСТ 14113-78), которые применяют для изготовления монометаллических и диметаллических подшипников методом литья. Основными компонентами сплавов являются олово, медь, никель, кремний, образующие с алюминием гетерогенные структуры. Чем больше в сплаве олова, тем выше его антифрикционные свойства. Однако в литых сплавах содержание олова не должно превышать 10-12%, так как образующаяся грубая сетка оловянистой составляющей снижает износостойкость и сопротивление усталости при повышении температуры.

Сплавы АО3-1 (2-4% Sn и 0,8-1,2% Cu) и АО9-2 (8-10% Sn и 2,0-2,5% Cu) применяют для отливки ма-  
нометрических вкладышей и втулок толщиной более 10 мм в



транспортном и общем машиностроении, причем при работе в тяжело нагруженных скоростных шинах на рабочую поверхность наносят слой (0,02-0,03 мм) олова или другого мягкого металла.

## 5.2. Магний и его сплавы

Магний – металл светло-серого цвета. Характерным свойством магния является его малая плотность ( $1,74 \text{ г/см}^3$ ). Температура плавления магния  $650^\circ\text{C}$ . Кристаллическая решетка гексагональная ( $a=3,103$ ,  $c=5,2002 \text{ \AA}$ ,  $c/a=1,62354$ ). Теплопроводность магния значительно меньше, чем у алюминия [ $0,37 \text{ кал/(см}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C)}$ ], коэффициенты линейного расширения алюминия и магния примерно одинаковые ( $26,1 \cdot 10^{-6}$  в интервале  $20 - 100^\circ\text{C}$ ). Технический магний выпускают трех марок МГ90 (99,9% Mg), МГ95 (99,95% Mg) МГ96 (99,96% Mg). В качестве примесей присутствуют железо, кремний, алюминий, марганец. Вредными примесями являются железо, никель, медь и кремний, снижающие коррозионную стойкость магния. Механические свойства литого магния:  $\sigma_B=115 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2}=25 \text{ МПа}$ ,  $\delta=8\%$ ,  $E=45000 \text{ МПа}$ , HB30, а деформированного (прессованные прутки):  $\sigma_B=200 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2}=90 \text{ МПа}$ ,  $\delta=11,5\%$ ,  $E=4500 \text{ МПа}$ , HB40. На воздухе магний легко воспламеняется. Используется магний в пиротехнике и химической промышленности.

**Сплавы на основе магния.** Свойства магния можно значительно улучшить легированием. Чаще применяют сплавы магния с алюминием (до 10%), цинком (до 5-6%), марганцем (до 2,5%), цирконием (до 1,5%).

Алюминий и цинк, образующие с магнием твердые растворы и соединения  $\text{Mg}_4\text{Al}_3$  и  $\text{MgZn}_3$  в количестве до 6-7%, повышают механические свойства магния. Марганец с магнием образует твердый раствор  $\alpha$ . При понижении температуры растворимость марганца в магнии понижается и из  $\alpha$ -твердого раствора выделяется  $\beta$ -фаза. Марганец, не улучшая механические свойства, повышает сопротивление коррозии и улучшает свариваемость сплавов магния. Повышение коррозионной стойкости объясняют образованием пленки гидратированной окиси Mg-Mn и очисткой от железа.

Цирконий, будучи введен в сплавы магния с цинком, измельчает зерно, улучшает механические свойства и повышает сопротивление коррозии. Редкоземельные металлы и торий повышают жаропрочность магниевых сплавов.

Бериллий при содержании его 0,005-0,012% значительно уменьшает окисляемость магния при плавке, литье и термической



обработке.

Магниевого сплавы, как и алюминиевые, разделяют на две группы: литейные сплавы для получения деталей методом фасонного литья, их маркируют буквами МЛ, и деформируемые сплавы, подвергаемые прессованию, прокатке, ковке, штамповке и другим видам обработки давлением, их маркируют буквами МА. Литейные и деформируемые сплавы могут быть термически упрочняемыми и термически не упрочняемыми. Термическая обработка магниевых сплавов имеет много общего с термической обработкой алюминиевых сплавов.

Для устранения наклепа магниевые сплавы подвергают рекристаллизационному отжигу при температуре  $\sim 350^{\circ}\text{C}$ .

Некоторые магниевые сплавы могут быть упрочнены закалкой и старением. Нагрев приводит к растворению избыточных фаз ( $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_4$ ,  $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Zn}_2$  и т.д.) и получению после закалки пересыщенного твердого раствора. В процессе старения происходит выделение упрочняющих фаз. Особенностью магниевых сплавов является малая скорость диффузионных процессов, поэтому фазовые превращения протекают медленно. Это требует больших выдержек при нагреве под закалку (4-24 ч) и искусственном старении (16-24 ч). По этой же причине возможна закалка на воздухе. Многие сплавы воспринимают закалку при охлаждении отливок или изделий после горячей обработки давлением на воздухе, а, следовательно, они могут упрочняться при искусственном старении без предварительной закалки. Старение литых магниевых сплавов проводят при  $200\text{-}300^{\circ}\text{C}$ . Закалку осуществляют с температур  $380\text{-}420^{\circ}\text{C}$ . После закалки для достижения максимального упрочнения проводят искусственное старение при  $175\text{-}200^{\circ}\text{C}$ . Прочность магниевых сплавов в процессе старения можно повысить только на 20-35%. При этом пластичность их уменьшаются

*Литейные сплавы.* Широко применяют сплав МЛ5, в котором сочетаются высокие механические и литейные свойства. Он применяется для литья в землю, в кокиль и под давлением нагруженных крупногабаритных отливок (картеры двигателей, коробки передач и т. д.).

Сплав МЛ6 обладает лучшими литейными свойствами, чем МЛ5, и предназначается для изготовления тяжело нагруженных деталей.

Механические свойства сплавов МЛ5 и МЛ6 могут быть повышены гомогенизацией при  $420^{\circ}\text{C}$  в течение 12-24 ч. Более высокие значения временного сопротивления разрыву и предела



## Физическое и прикладное материаловедение

текучести сплав МЛ5 приобретает после старения при 175-190° С в течение 4-8 ч.

Сплав МЛ10 относится к группе жаропрочных сплавов для отливок, работающих при температурах до 300°С. Сплав используют после закалки (гомогенизации) при 539°С и старения при 200°С 12-16 ч.

Сплав МЛ12 предназначается для отливки деталей, требующих высокой герметичности и прочности в условиях нагружения. Сплав МЛ12 нагревают под закалку ступенчато (сначала 400°С±5, а затем 500°С±5) для гомогенизации неравновесной эвтектики и во избежание пережога с выдержками соответственно 2 и 2-3 ч. Охлаждение при закалке ведется на воздухе. После закалки дается длительное старение при 150°С. Магниевые сплавы хорошо обрабатываются резанием.

*Деформируемые сплавы.* Эти сплавы поставляют в виде горячекатаных прутков, полос, профилей, а также поковок и штамповок.

Магниевые сплавы, имеющие гексагональную решетку, при низких температурах малопластичны, так как сдвиг происходит только по плоскостям базиса. При нагреве появляются дополнительные плоскости скольжения и пластичность возрастает. Обработку давлением ведут при повышенных температурах - прессование при 340-440°С, а прокатку в интервале температур от 340-440°С (начало) до 225-250°С (конец). Штамповку проводят в интервале 480-280°С.

Например, сплав МА1 обладает высокой технологической пластичностью, хорошей свариваемостью и коррозионной стойкостью. По механическим свойствам он относится к сплавам низкой прочности. Введение в сплав Al-Mn 0,2% церия (МА8) измельчает зерно, повышает механические свойства и улучшает деформацию в холодном состоянии.

Сплав МА2-1, относящийся к системе Mg-Al-Zn, обладает достаточно высокими механическими свойствами, хорошей технологической пластичностью и свариваемостью. Однако он склонен к коррозии под напряжением. Сплав МА2-1 поддается всем видам листовой штамповки и легко прокатывается.

Сплав МА14 характеризуется повышенными механическими свойствами. Он жаропрочен до 250°С и не склонен к коррозии под напряжением.

К недостаткам сплава относятся склонность к образованию трещин при прокатке и плохая свариваемость.

Вследствие высокой удельной прочности магниевые спла-



вы нашли применение в авиастроении (колеса и вилки шасси, передние кромки крыльев, различные рычаги, корпуса приборов, фонари и двери кабин и т. д.), в ракетной технике (корпуса ракет, обтекатели, топливные и кислородные баки, ), в автостроении (картеры двигателей, коробки передач и другие.), электротехнике и радиотехнике (корпуса приборов, телевизоров и т. д.).

Из-за малой устойчивости против коррозии изделия из магниевых сплавов оксидируют. На оксидированную поверхность наносят лакокрасочные покрытия.

### 5.3. Бериллий

Бериллий – металл сероватого цвета. Температура плавления его 1294°C. Известны две полиморфные модификации бериллия: до 1250°C существует бериллий с гексагональной решеткой ( $a=2,2855 \text{ \AA}$ ,  $c=3,5840 \text{ \AA}$ ), а при более высокой температуре бериллий с объемно-центрированной кубической решеткой ( $a=2,548 \text{ \AA}$ ). Плотность бериллия 1,845 г/см<sup>3</sup>.

Заготовки из бериллия получают металлокерамическим способом с последующей пластической деформацией.

Размеры атома бериллия малы (атомный диаметр 2,26 Å), поэтому атомы примесей сильно искажают решетку и охрупчивают его. Чем мельче зерно бериллия, определяемое крупностью исходного порошка, тем выше его прочность и пластичность. Чем меньше примесей содержит бериллий, тем выше его пластичность, даже металл с 99,9% бериллия хрупок.

В деформированных полуфабрикатах бериллия развивается сильная текстура деформации, вызывающая резкую анизотропию свойств.

Для снятия наклепа проводят рекристаллизационный отжиг при 650- 750°C. Прочность после отжига снижается, а пластичность по сравнению с бериллием после теплой деформации повышается. Анизотропия свойств после отжига сохраняется. Рекристаллизованный бериллий часто имеет сильно развитую разноразмерность.

Большинство элементов ограниченно растворимы в бериллии в твердом состоянии. Поэтому получение сплавов на его основе затруднено.

Благодаря высокой проницаемости для рентгеновских лучей из бериллия изготавливают окна рентгеновских трубок.



Малое эффективное сечение захвата тепловых нейтронов в сочетании с небольшой атомной массой делают бериллий одним из лучших материалов для замедлителей и отражателей тепловых нейтронов атомных реакторов и оболочек тепловыделяющих элементов. Бериллий наиболее целесообразно использовать в малых реакторах для морских судов, самолетов и ракет.

Бериллий перспективен как конструкционный материал в авиации и ракетной технике. Высокий модуль упругости позволяет использовать бериллий для сверхзвуковых самолетов и управляемых снарядов.

#### 5.4. Медь и ее сплавы

Медь имеет гранцентрированную кубическую решетку с периодом 3,608 Å. Температура плавления 1083°C, плотность 8,94 г/см<sup>3</sup>. Прочность меди невелика, но она имеет высокую пластичность. На воздухе при наличии влаги и углекислого газа медь медленно окисляется, покрываясь пленкой зеленого цвета, которая является щелочным карбонатом меди. Эта пленка защищает медь от дальнейшей коррозии.

Медь принято считать эталоном электрической проводимости и теплопроводности по сравнению с другими металлами. Характеристики этих свойств меди принимают за 100%, в то время как у алюминия, магния и железа они составляют соответственно 60, 40 и 17% от соответствующих свойств меди. Механические свойства меди в литом состоянии:  $\sigma_B=160\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0,2}=35\text{МПа}$ ,  $\delta=25\%$ . Из-за низких значений предела текучести и высокой стоимости чистая медь как конструкционный материал не применяется. Около половины производимой меди используется в электро- и радиотехнике. Для проводов применяют электролитическую медь марок МЗ, содержащую 99,5% Cu, М2 – 99,7% Cu, М1 – 99,0% Cu, М0 – 99,95% Cu, М00 – 99,99% Cu (ГОСТ 859-2001).

Соединение деталей из меди и ее сплавов часто выполняют посредством твердой и мягкой пайки. Твердые припои изготавливают на основе меди и цинка с добавкой серебра; их температура плавления составляет 600-1000°C. Мягкие припои изготавливают из сплавов олова со свинцом ( $T_{пл.}=200-300^\circ\text{C}$ ).

Сплавы меди устойчивы против коррозии, обладают хорошими антифрикционными, технологическими и механическими свойствами и широко используются в качестве конструкционных



## Физическое и прикладное материаловедение

материалов. По технологическим характеристикам различают деформируемые и литейные медные сплавы, по химическому составу их делят на латуни и бронзы. Латуни представляют собой сплавы меди с цинком, а бронзы – сплавы меди с другими элементами.

Медные сплавы обозначают начальной буквой сплава Л – латунь или Бр – бронза, после чего следуют первые буквы основных элементов, образующих сплав: О – олово, Ц – цинк, Мц – марганец, А – алюминий, Ж – железо, Ф – фосфор, Б – бериллий, Х – хром, Н – никель и т.д., а после них цифры, указывающие содержание легирующих элементов в процентах. В деформируемых латунях не указывается содержание цинка, а в деформируемых бронзах – содержание меди, их концентрации определяются по разности. Например, ЛЖМц-59-1-1 – латунь, содержащая, %: 59 Cu, 1 Fe, 1 Mn и остальное – цинк; БрОФ6,5-0,15 – бронза: 6,5 Sn, 0,15P, остальное медь.

Порядок цифр в обозначениях марок деформируемых и литейных сплавов различен. В марках деформируемых латуней и бронз цифры, отделенные друг от друга дефисом, ставятся в конце обозначения и расположены в той же последовательности, что и буквы, например, ЛА60-1-1 или БрОЦ4-3.

В литейных латунях и бронзах содержание всех компонентов сплавов в процентах, в том числе содержание цинка, приведены сразу же после обозначающих их букв. Содержание меди в литейных сплавах определяется по разности от 100%. Например, ЛЦ16К4 – литейная латунь, содержащая 16% Zn, 4% Si, остальное – медь; БрО5Ц5С5 – литейная бронза, содержащая 5% Sn, 5% Zn, 5% Pb, остальное – медь.

**Сплавы меди с цинком, или латуни.** Двойные или многокомпонентные сплавы меди, в которых основным легирующим элементом является цинк, называют латунями. В системе Cu-Zn образуется шесть твердых растворов:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\eta$ , но практическое применение имеют сплавы, содержащие до 45% цинка, то есть однофазные ( $\alpha$ -) и двухфазные ( $\alpha+\beta$ )-латуни.

Однофазная  $\alpha$ -латунь представляет собой твердый раствор цинка в меди с решеткой ГЦК и может содержать до 39% Zn. Однофазная  $\alpha$ -латунь характеризуется высокой пластичностью. При содержании более 39% Zn в структуре появляется хрупкая  $\beta$ - фаза, представляющая собой твердый раствор с решеткой ОЦК на базе соединения CuZn с электронным типом



связи. Двухфазные латуни менее пластичные и более прочные. Однофазные  $\alpha$ -латуни редко легируют дополнительно другими элементами; они представляют собой обычно двойные сплавы меди с цинком. В марках этих латуней Л62, Л68, Л80, Л90 цифры показывают содержание меди. Цинк дешевле меди. Чем больше цинка в латуни, тем ниже ее стоимость. Из однофазных  $\alpha$ -латуней холодным деформированием изготавливают ленты, гильзы патронов, трубки теплообменников, проволоку.

Латунь, содержащая до 10% цинка, так называемый том-пак, имеет цвет золота и применяется для изготовления украшений.

Двухфазные ( $\alpha+\beta$ )-латуни легируют дополнительно алюминием, железом, никелем для увеличения прочности, а также для улучшения обрабатываемости на станках. Высокими коррозионными свойствами обладают латуни, легированные оловом (ЛО70-1, ЛО62-1) и называемые морскими латунями. Наибольшей прочностью обладают латуни, дополнительно легированные алюминием, железом, марганцем.

Отрицательным свойством деформированных латуней, содержащих более 20% Zn, является склонность к растрескиванию при вылеживании во влажной атмосфере, содержащей следы аммиака. «Сезонное растрескивание» обусловлено коррозией по границам зерен в местах неравномерной концентрации примесей. Для снижения этого дефекта после деформации латуни подвергают отжигу при температурах ниже температуры рекристаллизации (обычно около 250°C).

Из деформированных латуней изготавливают трубы, прутки, полосы, проволоку. Литейные латуни отливают в землю, в кокиль, под давлением, они идут на изготовление арматуры и деталей судостроения, гаек нажимных болтов для сложных условий работы, втулок, вкладышей и подшипников. Благодаря узкому интервалу между линиями ликвидуса и солидуса, литейные латуни не подвержены ликвации и усадочной пористости.

**Бронзы.** Двойные или многокомпонентные сплавы меди с оловом, алюминием, свинцом, бериллием, кремнием, хромом и другими элементами, среди которых цинк не является основным легирующим, называются бронзами. По главному легирующему элементу различают бронзы оловянные, свинцовые, кремниевые и т.д.

*Оловянные бронзы (ГОСТ 5017-74, ГОСТ 10025-78).* Особо широко применяются в машиностроении бронзы, в которых олово является основным легирующим элементом, в качестве до-



## Физическое и прикладное материаловедение

бавок используют олово, свинец, никель и др.

Диаграмма состояния системы медь – олово характеризуется сравнительно большим расстоянием между линиями ликвидуса и солидуса, поэтому особенностью двухкомпонентных оловянных бронз является их повышенная склонность к ликвации, вызванная медленно проходящим процессом диффузии, низкая жидкотекучесть и рассеянная пористость.

В соответствии с диаграммой состояния предельная растворимость олова в меди составляет 15,8%. Уже при содержании олова 5-6% в структуре появляется  $(\alpha+\beta)$ -эвтектоид, в котором  $\beta$ -фаза представляет собой твердое и хрупкое электронное соединение  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ . При этом снижаются пластичность и вязкость сплавов. Бронзы с содержанием олова более 12% из-за повышенной хрупкости как конструкционный материал практически не применяется.

Различают деформируемые и литейные оловянные бронзы. Деформируемые оловянные бронзы содержат 3-7% Sn, до 5% Zn, и до 0,4% P. Например БрОЦС4-2,5 содержит 3-5% Sn, 3,5% Zn, 1,5-3,5% Pb. Они состоят из однородного твердого раствора и после отжига имеют однофазную структуру. Благодаря хорошей пластичности они легко подвергаются обработке давлением и поставляются в виде прутков, труб и лент. Этот вид бронз используется также для изготовления различных деталей с высокими упругими свойствами. Их прочность  $\sigma_B=320-350$  МПа при относительном удлинении  $\delta=30-50\%$ .

При концентрации олова 9-11% в структуре увеличивается количество хрупкой составляющей – эвтектоида, содержащего соединение  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ , что исключает возможность пластической деформации. Такие бронзы применяются только в литом состоянии. Примером такой бронзы является БрО5Ц5С5, содержащая 4-6% Sn, 4-6% Zn, 4-6% Pb.

Литые оловянные бронзы с цинком и свинцом имеют высокие литейные свойства: малую объемную усадку (менее 1%) и хорошую жидкотекучесть. Из бронзы изготавливают сложные отливки, в частности художественное литье.

Высокая коррозионная стойкость позволяет использовать литейные бронзы в качестве арматуры, работающей в агрессивных средах и обладающей высокой электрической проводимостью и теплопроводностью.

Наличие включений твердого эвтектоида обеспечивает высокую стойкость против истирания, а мягкие частицы облегчают «приработку» и образуют на поверхности мельчайшие каналы,



по которым может циркулировать смазка. Поэтому бронзы, содержащие 9-10% Sn, являются одним из лучших антифрикционных материалов и применяются для изготовления подшипников. Для улучшения антифрикционных свойств в состав бронз также вводят свинец.

Из безоловянных бронз наибольшее применение нашли алюминиевые, кремниевые и бериллиевые бронзы.

*Алюминиевые бронзы.* Из диаграммы состояния системы Cu-Al следует, что сплавы, содержащие до 9% Al, однофазные и состоят только из  $\alpha$ -твердого раствора алюминия в меди. Увеличение содержания алюминия более 9% приводит к появлению в структуре эвтектоида  $\alpha+\gamma_2$ , в котором  $\gamma_2$  представляет собой твердое и хрупкое электронное соединение  $Cu_{32}Al_{19}$ .

Гетерогенная структура, состоящая из мягкой основы  $\alpha$ -твердого раствора и твердых дисперсных включений эвтектоида, обеспечивает высокие антифрикционные свойства алюминиевых бронз, которые применяются для изготовления деталей, работающих в условиях трения.

Однофазные алюминиевые бронзы характеризуются высокой пластичностью, их используют для глубокой штамповки. Например, БрАЖ9-4 содержит 9% Al, 4% Fe и имеет следующие механические свойства:  $\sigma_B=600$  МПа,  $\delta=40\%$ . Двухфазные бронзы подвергают горячей обработке давлением или используют в виде фасонного литья.

Алюминиевые бронзы по коррозионной стойкости в морской воде и тропической атмосфере превосходят оловянные бронзы и латуни и конкурируют с хромоникелевыми аустенитными коррозионностойкими сталями.

Дополнительное легирование алюминиевых бронз железом (до 5,5%), марганцем (до 2%) и никелем (до 5,5%) повышает их механические свойства. Примером является БрАЖН10-4-4, содержащая 10% Al, 4% Fe, 4% Ni. Из алюминиевых бронз изготавливают фрикционные шестерни, зубчатые колеса, втулки, краны, детали водяных и паровых турбин.

*Кремнистые бронзы.* Кремнистые бронзы обычно содержат до 3% Si, часто их дополнительно легируют никелем или марганцем. Например, БрКМц3-1 содержит 3% Si, 2% Mn, остальное – медь.

Сравнительно небольшой интервал кристаллизации обеспечивает кремнистым бронзам хорошие литейные свойства. Их обычно используют в качестве заменителя оловянных бронз, например, БрКЦ4-4 может заменять БрОЦС5-5-5. Уступая оловянной



## Физическое и прикладное материаловедение

бронзе по величине усадки, она имеет более высокие механические свойства, плотность отливок и коррозионную стойкость.

*Свинцовая бронза.* Свинец практически нерастворим в меди. После затвердевания сплав состоит из кристаллов меди, перемежающихся включениями свинца. Благодаря такой структуре бронза БрС30 (30% Pb) имеет высокие антифрикционные свойства, что позволяет ее использовать взамен оловянных бронз для подшипников скольжения. Высокая теплопроводность бронзы БрС30 позволяет эффективно отводить тепло из зоны трения.

Свинцовая бронза имеет невысокие механические свойства ( $\sigma_B=70$  МПа,  $\delta=4\%$ ). Для повышения надежности вкладышей подшипников тонкий слой бронзы наплавляют на основу из стальной ленты.

*Бериллиевая бронза.* Медь образует с бериллием  $\alpha$ -твердые растворы замещения с решеткой ГЦК, причем с понижением температуры растворимость бериллия в меди падает, что позволяет достичь значительного упрочнения при термической обработке.

При нагреве бериллиевой бронзы, содержащей 2,0-2,5% Be, до 760-780°C образуется однородный  $\alpha$ -твердый раствор. После быстрого охлаждения эта структура сохраняется при комнатной температуре. Закаленная бериллиевая бронза БрБ2 имеет малую прочность ( $\sigma_B=500$  МПа) при высокой пластичности ( $\delta=30\%$ ). В результате старения при 300-350°C из пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора выделяются дисперсные частицы  $\gamma$ -фазы (CuBe). Дисперсионное твердение резко увеличивает прочностные свойства:  $\sigma_B=1200$  МПа при  $\delta=4\%$ .

Благодаря более высокому уровню временного сопротивления и предела упругости бронзы БрБ2 по сравнению с другими медными сплавами бериллиевые бронзы находят применение для изготовления пружин, мембран, пружинящих контактов. Инструменты из бериллиевой бронзы не дают искр, поэтому их применяют в производстве взрывчатых веществ.

Широкое применение бериллиевых бронз ограничивается высокой стоимостью бериллия.



## 6. АНТИФРИКЦИОННЫЕ СПЛАВЫ, ПРИПОИ, ЛЕГКОПЛАВКИЕ СПЛАВЫ

### 6.1. Антифрикционные сплавы

В машиностроении применяют как подшипники качения, так и подшипники скольжения. Подшипники скольжения применяют в виде вкладышей. Для их изготовления используют антифрикционные сплавы.

Основные требования, предъявляемые к антифрикционным сплавам, - низкие значения коэффициента трения со стальной поверхностью вала и высокая износостойкость подшипников. Для их удовлетворения необходимо, чтобы поверхности вала и вкладыша были разделены пленкой смазки. Высокие антифрикционные свойства обеспечиваются гетерогенной структурой сплава, состоящей из мягкой и пластичной основы и включений твердых частиц. Мягкая основа прирабатывается к валу и вместе с твердыми включениями образует оптимальный антифрикционный микрорельеф с пространством для удерживания смазочных материалов (так называемый принцип Шарпи).

Для повышения износостойкости вкладыши должны иметь высокие механические свойства и выдерживать достаточные удельные давления.

Антифрикционные материалы должны иметь высокую теплопроводность для хорошего отвода тепла от трущихся поверхностей и низкую температуру плавления. Для подшипников скольжения используют чугунные вкладыши, бронзовые вкладыши и баббиты.

Чугунные вкладыши для подшипников являются наиболее дешевым антифрикционным материалом. Для этой цели используют высококачественные чугуны, имеющие перлитную основу и повышенное количество графита. Графит сам является смазкой и одновременно впитывает смазочные масла, тем самым дополнительно снижая коэффициент трения. Чугунные вкладыши применяют для неотчетственных подшипников в тихоходных двигателях из-за сравнительно высокого коэффициента трения пары сталь – чугун (по сравнению с парами бронза – сталь и баббит – сталь).

Бронзовые вкладыши применяют для подшипников более ответственного назначения, используемых в быстроходных двигателях, при высоких удельных давлениях и значительных динамических нагрузках. Для изготовления бронзовых вкладышей при-



меняют оловянные и свинцовые бронзы, например марок БрОС8-12 (8% Sn, 12% Pb), БрОС5-25 (5% Sn, 25% Pb), БрС30 (30% Pb). Недостатком бронз является их высокая стоимость и сравнительно невысокая механическая прочность, поэтому их иногда наплавляют на стальную ленту.

Специальные подшипниковые сплавы – баббиты – имеют минимальный коэффициент трения со сталью, хорошо прирабатываются к валу и легко удерживают смазку: благодаря вязкой основе они легко поглощают посторонние твердые частицы, не образуя задиров вала. Обычно применяют баббиты на оловянной либо на свинцовой основе. Например, баббит Б83 содержит 10-12% Sb, 5,5-6,5% Cu, остальное – олово, баббит БС6 содержит 5,5-6,5% Sn, 5,5-6,5% Sb, 0,1-0,3% Cu, остальное – свинец.

Наилучшими антифрикционными и механическими свойствами обладают оловянные баббиты. Микроструктура баббита Б83 состоит из мягкой основы  $\alpha$ -твердого раствора свинца и меди в олове, более твердых кристаллов  $\beta$ -фазы SnSb и дисперсных включений соединения  $Cu_3Sn$ .

Подшипниковые вкладыши из-за низкой прочности баббита изготавливают либо штамповкой из биметаллической ленты баббит-сталь, либо заливкой центробежным способом или литьем под давлением в более прочный стальной, чугунный или бронзовый корпус.

## 6.2. Припои

Сплавы, применяемые для пайки металлов, называют припоями. Припои должны обладать сравнительно невысокой температурой плавления и в расплавленном состоянии хорошо смачивать паяемый материал.

Припои бывают двух видов: мягкие и твердые. Мягкие оловянные припои имеют низкую температуру плавления (200-300°C) и обеспечивают лишь герметичность спая без высоких механических свойств ( $\sigma_B=50-70$  МПа). Из-за низкой прочности соединения паяная деталь не должна подвергаться высоким механическим нагрузкам. В качестве мягких припоев чаще всего применяют сплавы свинца и олова, обозначаемые ПОС-60, ПОС-40, ПОС-30, где цифры указывают на содержание олова в процентах. Припой ПОС-60 в производстве обычно называют третником, из мягких припоев является наиболее легкоплавким ( $T_{пл.}=185^\circ\text{C}$ ).

Кроме оловянно-свинцовых мягких припоев применяют оловянно-цинковые, содержащие 40, 60, 90% Sn (марки ПОЦ-40,



ПОЦ-60, ПОЦ-90). Они имеют более высокую прочность.

Твердые припои имеют высокую температуру плавления, их применение для пайки сложнее, но спай имеет значительно более высокие механические свойства. При пайке медных сплавов свойства припоев близки к свойствам основного металла. В качестве твердых припоев используют латуни Cu-Zn или сплавы Cu-Zn-Ag, так называемые серебряные припои с температурой плавления около 800°C. Серебряные припои маркируют буквами ПСр и цифрой, показывающей среднее содержание серебра в процентах, например ПСр-25, ПСр-50.

### 6.3. Легкоплавкие сплавы

К легкоплавким относят сплавы с температурой плавления ниже температуры плавления их основной составляющей – олова (232°C). В их состав входят металлы с низкой температурой плавления: свинец, кадмий, висмут, цинк, образующие с оловом многокомпонентные эвтектики.

Маркируются легкоплавкие сплавы буквой Л и цифрой, показывающей температуру плавления сплава в градусах Цельсия:

Л199 (8,9% цинка, остальное – олово), Л130 (52% Sn, 30% Pb, 13% Cd, 5% Bi). Широко известен сплав Вуда на основе висмута Л68 (12,5% Sn, 25,0% Pb, 12,5% Cd, 50,0% Bi), названный по имени его изобретателя американского химика и археолога Б. Вуда.

Легкоплавкие сплавы используют в качестве предохранителей, особо легкоплавких припоев, моделей для пластмассовых отливок сложной формы. Сплав Вуда используют в качестве материала для изготовления слепков.

## 7. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Неметаллические материалы (пластмасса, резина, керамика, стекло, клей, лакокрасочные покрытия, древесина, ткань и др.) в качестве конструкционных материалов служат важным дополнением к металлам, в ряде случаев с успехом заменяют их, а иногда неметаллические материалы сами являются незаменимыми. Двигатели внутреннего сгорания из керамики обходятся без водяного охлаждения, что невозможно при изготовлении их из металла; обтекатели ракет делают только из неметаллических



материалов (графита, керамики). Достоинством неметаллических материалов является сочетание требуемого уровня химических, физических и механических свойств с низкой стоимостью и высокой технологичностью при изготовлении изделий сложной конфигурации. Трудоемкость при изготовлении изделий из неметаллических материалов в 5-6 раз ниже, и они в 4-5 раз дешевле по сравнению с металлическими. В связи с этим непрерывно возрастает использование неметаллических материалов в машиностроении, автомобилестроении, авиационной, пищевой, холодильной и криогенной технике и др.

## 7.1. Материалы на основе полимеров

### 7.1.1. Состав и строение полимеров

В основе неметаллических материалов лежат полимеры. Полимерами называются высокомолекулярные химические соединения, состоящие из многочисленных маломолекулярных звеньев (мономеров) одинакового строения. Макромолекулы представляют собой длинные цепи из мономеров, что определяет их большую гибкость. Отдельные атомы в мономерах соединены между собой довольно прочными ковалентными химическими связями. Между макромолекулами полимеров действуют значительно более слабые физические связи. Например, мономеры этилен  $C_2H_4$  или винилхлорид  $C_2H_3Cl$  после разрыва двойных ковалентных связей создают цепь из мономерных звеньев (меров), т.е. полимеры, которые называются соответственно полиэтилен и поливинилхлорид (рис.3).

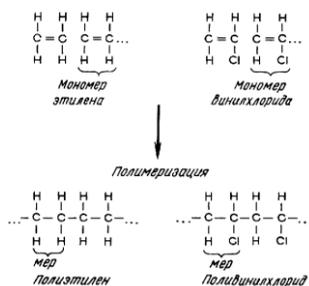
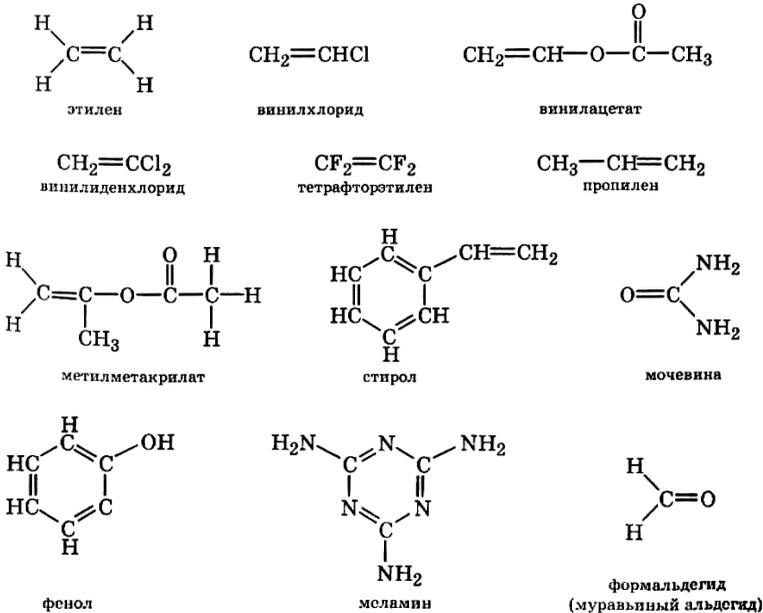


Рис.3. Схема полимеризации этилена и винилхлорида



## Физическое и прикладное материаловедение

Чаще всего для получения полимеров применяют следующие мономеры:



Особенностью молекул полимеров является их большая молекулярная масса ( $M \geq 5 \cdot 10^3$ ). Соединения с меньшей молекулярной массой ( $M=500-5000$ ) называются олигомерами, у низкомолекулярных соединений  $M < 500$ . Это разделение по молекулярной массе условно.

Различают природные и синтетические полимеры. К полимерам, встречающимся в природе, относятся натуральный каучук, целлюлоза, слюда, асбест, шерсть и т.д. Однако ведущее место занимают синтетические полимеры, получаемые в процессе химического синтеза из низкомолекулярных соединений.

В зависимости от способа образования высокомолекулярных синтетических соединений различают полимеры, получаемые либо в процессе поликонденсации, либо в результате реакции присоединения.

Полимеризация — это процесс соединения низкомолекулярных соединений в высокомолекулярные с образованием длинных цепей. Величиной степени полимеризации является количество меров в молекуле полимера. В большинстве полимеров их количество составляет от 1000 до 10000 единиц. В результате полимеризации получают такие часто применяемые полимеры,



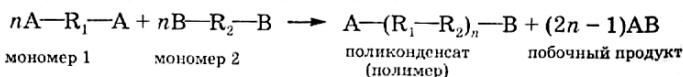
## Физическое и прикладное материаловедение

как полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, политетрафторэтилен, полибутадиен и др.

Поликонденсация – это ступенчатая реакция, заключающаяся в соединении большого количества одинаковых мономеров или двух различных групп (А и В) мономеров в макромолекулы (поликонденсаты) с одновременным образованием побочных продуктов (вода, аммиак, хлороводород, диоксид углерода, метиловый спирт и др.). В первом случае полимеры образуются по такой схеме:



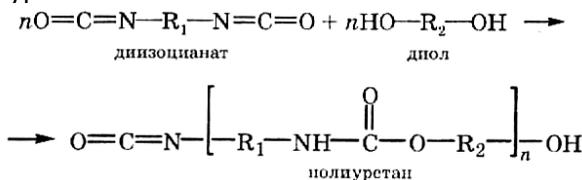
Во втором случае полимеры образуются по другой схеме:



С помощью реакции поликонденсации получают полиамиды, полиэстеры, фенопласты, аминопласты, поликарбонаты, полисульфоны, силиконы и другие полимеры.

Полиприсоединение - процесс образования полимера в результате реакции множественного присоединения мономеров, содержащих предельные реакционные группы, к мономерам, содержащим непредельные группы (двойные связи или активные циклы). В отличие от поликонденсации полиприсоединение протекает без выделения побочных продуктов.

К важнейшим реакциям полиприсоединения относятся получение полиуретанов



и процесс отверждения эпоксидных смол:



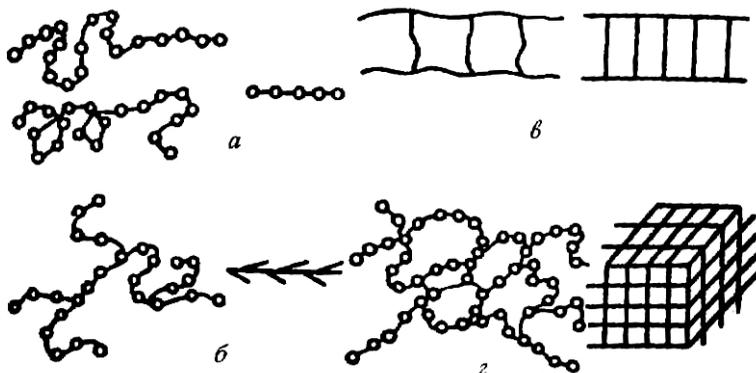
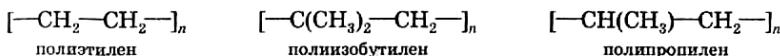


Рис. 4. Различные типы структур полимеров: а – линейная; б – линейно-разветвленная; в – лестничная; г – пространственная сетчатая

Полимеры с линейной структурой представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки (см.рис.4,а). Их макромолекулы характеризуются повторениями вдоль цепи одной и той же структурной группы – звена или химической единицы цепи. Для полимеров с линейной структурой существенно наличие достаточно длинных макромолекул с резким различием характера связи вдоль цепи и между цепями (химические и межмолекулярные связи).

Для макромолекул полимеров с линейной структурой характерна высокая гибкость. Гибкость – основное свойство полимерных цепей, приводящее к качественно новым свойствам: высокой эластичности и отсутствию хрупкости в твердом состоянии. Полимеры с линейно-разветвленной структурой помимо основной цепи имеют боковые ответвления (см.рис.4,б). К типичным полимерам с линейной структурой относится полиэтилен, с линейно-разветвленной – полиизобутилен и полипропилен:



Здесь в скобках приведена химическая структура звена, а индекс  $n$  указывает степень полимеризации.

Молекула полимера с лестничной структурой (см.рис.4,в) состоит из двух цепей, соединенных химическими связями. Полимеры с лестничной структурой, к которым относятся, например, кремнийорганические полимеры, характеризуются повышенной термостойкостью, жесткостью, они нерастворимы в органических



растворителях.

Полимеры с пространственной структурой (см.рис.4,г) образуют при соединении макромолекул между собой в поперечном направлении прочные химические связи. В результате такого соединения макромолекул образуется сетчатая структура с различной густотой сетки или пространственная сетчатая структура.

Полимеры с пространственной структурой обладают большей жесткостью и теплостойкостью, чем полимеры с линейной структурой. Полимеры с пространственной структурой являются основой конструкционных неметаллических материалов.

По фазовому составу полимеры представляют собой системы, состоящие из кристаллических и аморфных областей. Кристаллическое состояние характеризуется наличием дальнего порядка в расположении макромолекул. Такое упорядочение кристаллических полимеров приводит к образованию монокристаллов, первичными элементами которых являются кристаллические ячейки. Для кристаллического состояния характерны различные структуры образований (надмолекулярные структуры). К ним в первую очередь относятся ленты. Из лент строятся плоскости, которые представляют собой важнейший структурный элемент кристаллического полимера. Когда образование правильных объемных кристаллов затруднено, то образуется сферолитная структура. Сферолиты состоят из лепестков, образованных последовательным чередованием кристаллических и аморфных участков.

Кристаллические полимеры по своему строению похожи на обычные кристаллические твердые тела, но сложнее, поскольку наряду с кристаллической фазой имеют в объеме аморфную фазу с межфазными слоями.

Аморфные полимеры по строению близки к жидкостям. В них существуют упорядоченные участки, в которых наблюдается ближний порядок в расположении молекул. Эти участки термодинамически неустойчивы, имеют флуктуационный характер, могут многократно разрушаться и вновь возникать. Но и в аморфном состоянии полимер может быть весьма упорядоченным.

Кристаллическая форма полимеров способствует повышению их твердости, прочности, модуля упругости и других механических характеристик, одновременно снижая гибкость молекул. Аморфная фаза уменьшает жесткость, делает полимер более эластичным, т.е. способным к большим обратимым деформациям. Отношение объема всех кристаллических областей к общему объему называют степенью кристалличности. Высокую степень кри-



## Физическое и прикладное материаловедение

сталличности (60-80%) имеют фторопласты, полипропилен, полиэтилен высокой плотности. Меньшей степенью кристалличности обладают поливинилхлорид, полиэтилен низкой плотности.

В зависимости от того, как ведут себя полимеры при нагреве они делятся на термопластичные и термореактивные. Термопластичные полимеры при нагреве размягчаются и плавятся, а при охлаждении затвердевают. При этом материал не претерпевает химических превращений, что делает процесс плавления – затвердевания полностью обратимым. Термопластичные полимеры имеют линейную или линейно-разветвленную структуру макромолекул. Между молекулами действуют слабые силы и нет химических связей. К термопластам относятся полиэтилен, полистирол, полиамиды и др. Изделия из термопластичных полимеров изготавливают литьем под давлением в водоохлаждаемые формы, прессованием, экструзией, выдуванием и другими способами.

Термореактивные полимеры сначала имеют линейную структуру и при нагреве размягчаются, затем в результате протекания химических реакций приобретают пространственную структуру и превращаются в твердое вещество, сохраняя и в дальнейшем высокую твердость. Последующий нагрев не размягчает их и может привести только к их разложению. Готовый термореактивный полимер не плавится и не растворяется, поэтому в отличие от термопластичного не может подвергаться повторной переработке. К термореактивным полимерам относятся фенолоформальдегидная, кремнийорганическая, эпоксидная и другие смолы.

### 7.1.2. Основные свойства полимеров

Полимеры могут находиться в твердом и жидком состояниях (газообразное состояние для них не характерно), кристаллическом и аморфном фазовых состояниях, а также в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем деформационных физических состояниях.

Особенности химической природы, строения и размеров молекул, их взаимного расположения и упаковки оказывают большое влияние на физико-механические свойства полимеров.

Полимеры имеют высокую стойкость в таких средах, как щелочи и концентрированные кислоты. В отличие от металлов они не подвержены электрохимической коррозии. С увеличением молекулярной массы снижается растворимость полимеров в растворителях органического происхождения. Полимеры с простран-



## Физическое и прикладное материаловедение

ственной структурой практически не подвержены действию органических растворителей.

Большинство полимеров является диэлектриками. Полимеры в основном относятся к немагнитным веществам. Из всех применяемых конструкционных материалов полимеры имеют наименьшую теплопроводность и наибольшие теплоемкость и тепловую усадку. Тепловая усадка полимеров примерно в 10-20 раз больше, чем металлов. Причиной потери герметичности уплотнительными узлами при низких температурах является стеклование резины и резкое различие коэффициентов расширения металла и резины в застеклованном состоянии.

Для полимеров характерен широкий диапазон механических характеристик, сильно зависящий от их структуры. Кроме структурных параметров большое влияние на механические свойства полимеров оказывают внешние факторы: температура, длительность и частота или скорость нагружения, давление, вид напряженного состояния, термообработка, характер окружающей среды и др.

Особенностями механических свойств полимеров являются их удовлетворительная прочность, но малая жесткость по сравнению с металлическими материалами.

Полимерные материалы подразделяются на твердые с модулем упругости  $E=1-10$  ГПа (пластмассы, волокна, пленки) и мягкие высокоэластичные материалы с модулем упругости  $E=1-10$  МПа (резины). Механизм и закономерности разрушения тех и других существенно различны.



Для полимеров характерны ярко выраженная анизотропия свойств, снижение прочности и развитие ползучести при длительном нагружении. Вместе с тем полимеры обладают высоким сопротивлением усталости. Для полимеров характерна более выраженная температурная зависимость механических свойств по сравнению с металлами.

Одной из основных характеристик полимеров является деформируемость. По деформируемости (или податливости) полимеров в широком температурном интервале чаще всего оценивают их основные технологические и эксплуатационные свойства. Значение деформируемости определяют методом термомеханических кривых «деформация – температура» (рис.5).

Термомеханические кривые получают при нагреве нагруженного образца полимера с заданной скоростью. Действующая нагрузка должна быть постоянной по величине и малой по значению, чтобы механические воздействия на полимер не приводили к изменению его структуры. Анализ кривой на рис.5 показывает, что полимер может находиться в трех физических состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

В стеклообразном состоянии при малых напряжениях наблюдается только упругая деформация с высоким модулем упругости ( $E=2,2-5$  ГПа). Стеклообразное состояние является одной из форм твердого состояния высокомолекулярных веществ. Выше температуры стеклования к этой деформации добавляется высокоэластическая составляющая, которая значительно превосходит упругую и характеризуется модулем высокоэластичности  $E= 0,1-1$  МПа.

Выше температуры текучести проявляется еще одна составляющая деформации, которая приводит к постепенному накоплению остаточной деформации образца полимера.

Границы между этими физическими состояниями характеризуются значениями температур стеклования  $T_c$  и текучести  $T_t$ .

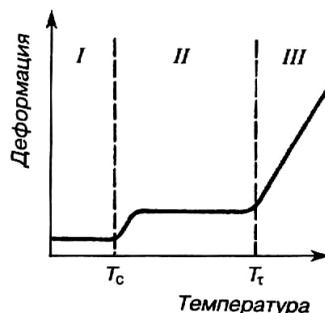


Рис.5. Термомеханическая кривая аморфного полимера с линейной структурой:  $T_c$  и  $T_t$  - температуры соответственно стеклования и начала вязкого течения; I, II III - участки соответственно стеклообразного, высокоэластического и вязкотекучего состояний



Критические температуры  $T_c$  и  $T_t$  являются основными характеристиками полимеров. Важность этих характеристик хорошо иллюстрируется следующими примерами. Во многих случаях волокна и полимеры должны иметь высокую прочность. Поэтому лежащие в их основе полимеры должны находиться в стеклообразном состоянии. Резиновой промышленности, наоборот, необходимы высокоэластичные полимеры, сохраняющие это состояние в широком температурном интервале. Процесс технологической переработки полимеров происходит, как правило, в области вязкотекучего состояния. поэтому для переработки они должны быть нагреты выше соответствующей температуры  $T_t$ .

Все полимеры в большей или меньшей степени подвержены процессу старения во времени. Старением (ageing treatment) полимеров называют самопроизвольное необратимое изменение важнейших технических характеристик, происходящее в результате сложных химических и физических процессов, развивающихся в материале при эксплуатации и хранении.

Старению способствуют свет, частая смена циклов нагрев - охлаждение, воздействие кислорода, озона и другие факторы. Старение ускоряется при многократных деформациях, менее существенное влияние на старение оказывает влага. При старении повышается твердость, хрупкость, теряется эластичность. При высоких температурах (200-250°C) происходит термическая деструкция - разложение органических полимеров, сопровождающееся испарением летучих веществ.

Ускоренное старение наблюдается при действии механических напряжений, когда не успевают протекать процессы релаксации напряжений, в результате чего ослабляются или нарушаются химические связи. При длительной работе резин в растянутом состоянии на их поверхности под действием атмосферного кислорода образуется хрупкая пленка, склонная к расслаиванию.

Для замедленного старения в полимерные материалы добавляют стабилизаторы. Обычно применяют стабилизаторы двух типов: термостабилизаторы (амины, фенолы) и светостабилизаторы (например, сажу).

Длительность эксплуатации стабилизированных полимеров значительно возрастает. Срок наступления хрупкости полиэтилена, стабилизированного сажей, составляет свыше 5 лет. Трубы из поливинилхлорида могут работать 10-25 лет.



### 7.1.3. Пластические массы. Общая характеристика пластмасс

Пластмассы – это синтетические материалы, получаемые на основе органических и элементоорганических полимеров. Свойства пластмасс определяются свойствами полимеров, составляющих их основу.

Пластмассы состоят из нескольких компонентов: связующего вещества, наполнителя, пластификатора и др. Обязательным компонентом является связующее вещество. Такие простые пластмассы, как полиэтилен, вообще состоят из одного связующего вещества. Наполнителями служат твердые материалы органического и неорганического происхождения. Они придают пластмассам прочность, твердость, теплостойкость, а также некоторые специальные свойства, например антифрикционные или, наоборот, фрикционные. Кроме того, наполнители снимают усадку при прессовании.

Пластификаторы представляют собой нелетучие жидкости с низкой температурой замерзания. Растворяясь в полимере, пластификаторы повышают его способность к пластической деформации. Их вводят для расширения температурной области высокоэластического состояния, снижения жесткости пластмасс и температуры хрупкости.

В качестве пластификатора применяют сложные эфиры, низ-комолекулярные полимеры и др. Пластификаторы должны оставаться стабильными в условиях эксплуатации. Их наличие улучшает морозостойкость и огнестойкость пластмасс.

В состав пластмасс могут также входить стабилизаторы, отвердители, красители и другие вещества. Стабилизаторы вводят в пластмассы для повышения долговечности. Светостабилизаторы предотвращают фотоокисление, а антиокислители – термоокислительные реакции. Отвердители изменяют структуру полимеров, влияя на свойства пластмасс. Чаще используют отвердители, ускоряющие полимеризацию. К ним относятся оксиды некоторых металлов, уротропин и др.

Специальные химические добавки вводят с различными целями: например, сильные органические яды – фунгициды – для предохранения пластмасс от плесени и поедания насекомыми в условиях тропиков. Смазывающие вещества (стеарин, олеиновая кислота) применяют для предотвращения прилипания пластмассы к оборудованию при производстве и эксплуатации изделий. Красители и пигменты придают желаемую окраску пластмассам.



## Физическое и прикладное материаловедение

Для пластмасс характерны следующие свойства:

- низкая плотность (обычно  $1,0-1,8 \text{ г/см}^3$ , в некоторых случаях до  $0,02-0,04 \text{ г/см}^3$ );

- высокая коррозионная стойкость. Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии, на них не действуют слабые кислоты и щелочи. Есть пластмассы, стойкие к действию концентрированных кислот и щелочей. Большинство пластмасс безвредны в санитарном отношении;

- высокие диэлектрические свойства;

- хорошая окрашиваемость в любые цвета. Некоторые пластмассы могут быть изготовлены прозрачными, не уступающими по своим оптическим свойствам стеклам;

- механические свойства широкого диапазона. В зависимости от природы выбранных полимеров и наполнителей пластмассы могут быть твердыми и прочными или же гибкими и упругими. Ряд пластиков по своей механической прочности превосходит чугун и бронзу. При одной и той же массе пластмассовая конструкция может по прочности соответствовать стальной;

- антифрикционные свойства. Пластмассы могут служить полноценными заменителями антифрикционных сплавов (оловянистых бронз, баббитов и др.), например, полиамидные подшипники скольжения длительное время могут работать без смазки;

- высокие теплоизоляционные свойства. Все пластмассы, как правило, плохо проводят теплоту, а теплопроводность таких теплоизоляторов, как пено- и поропласты, почти в 10 раз меньше, чем у обычных пластмасс;

- высокие адгезионные свойства;

- хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии (без снятия стружки): литьем, прессованием, формованием с применением невысоких давлений или в вакууме.

Недостатком большинства пластмасс является их невысокая теплостойкость (до  $100-120^\circ\text{C}$ ). В настоящее время верхний температурный предел для некоторых видов поднялся до  $300-400^\circ\text{C}$ . Пластмассы могут работать при умеренно низких температурах (до  $-70^\circ\text{C}$ ), а в отдельных случаях – при криогенных температурах. Недостатками пластмасс также являются их низкая твердость, склонность к старению, ползучесть, нестойкость к большим статическим и динамическим нагрузкам. Однако положительные свойства значительно превосходят их недостатки, что обуславливает высокие темпы роста ежегодного производства пластмасс.

По характеру связующего вещества пластмассы подразде-



ляются на термопластичные (термопласты), получаемые на основе термопластичных полимеров, и термореактивные (реактопласты), т.е. неразмягчающиеся.

### Термопластичные пластмассы (термопласты)

Широкое применение находят термопластичные пластмассы на основе полиэтилена, полипропилена, полистирола, поливинилхлорида, фторопластов, полиамидов и других полимеров.

**Полиэтилен** имеет линейную структуру макромолекул  $[\text{CH}_2-\text{CH}_2]_n$  и является продуктом полимеризации этилена. Свойства полиэтилена зависят от условий полимеризации. По способу изготовления различают полиэтилен низкой плотности (0,918–0,930 г/см<sup>3</sup>), получаемый полимеризацией при высоком давлении (ГОСТ 16337-77Е), и полиэтилен высокой плотности (0,946–0,970 г/см<sup>3</sup>), получаемый полимеризацией при низком давлении (ГОСТ 16338-85Е). Полиэтилен высокой плотности имеет степень кристалличности до 75–95%. Чем выше плотность и степень кристалличности полиэтилена, тем выше его прочность, модуль упругости и теплостойкость. Разрушающее напряжение при растяжении полиэтилена низкой плотности составляет 10–17 МПа, полиэтилена высокой плотности – 18–35 МПа.

Полиэтилен имеет высокие диэлектрические свойства, практически не поглощает влагу. Он химически стоек к действию кислот, щелочей и растворителей, нетоксичен, легко сваривается, технологичен (поддается экструзии, литью, напылению, заливке и т.д.), стоит недорого и сочетает высокую прочность с пластичностью. Недостатком полиэтилена является склонность к старению под действием ультрафиолетовых лучей.

Полиэтилен (ГОСТ 25951-83, ГОСТ 20477-86, ГОСТ 10354-82) выпускается в виде пленок толщиной 0,03–0,30 мм, шириной 1400 мм и длиной 30 м, а также в виде листов толщиной 1–6 мм и шириной до 1400 мм. Полиэтилен применяют для изоляции электропроводов и кабелей, в качестве упаковочного материала для пищевых продуктов, для защиты от коррозии магистральных нефте- и газопроводов, в качестве заменителя стекла, для изготовления предметов домашнего обихода, для защиты металлов от коррозии. Полиэтиленовые трубы могут работать при температурах по -60°C, они не подвержены почвенной коррозии. Из полиэтилена изготавливают крышки подшипников, уплотнительные прокладки, детали вентиляторов и насосов, гайки, шайбы, полые из-



## Физическое и прикладное материаловедение

деляя вместимостью до 200 л, тару для хранения и транспортировки кислот и щелочей.

**Полипропилен** является полимером пропилена:  $[-CH_2-CH(CH_3)-]_n$ . По сравнению с полиэтиленом полипропилен имеет более высокую механическую прочность и жесткость, большую теплостойкость и меньшую склонность к старению. Разрушающее напряжение при растяжении полипропилена достигает 25-40 МПа. Недостатком полипропилена является его невысокая морозостойкость (-20 °С).

Детали из полипропилена изготавливают штамповкой, литьем под давлением, пневматическим и вакуумным прессованием; полиэтилен можно сваривать, напылять на металл, ткань, картон. Он легко подвергается механической обработке на токарных, фрезерных, сверлильных станках.

Полипропилен применяют для изготовления антикоррозионной футеровки резервуаров, труб и арматуры трубопроводов, электроизоляционных деталей, а также для изготовления деталей, применяемых при работе в агрессивных средах. Из полипропилена изготавливают корпусные детали автомобилей и корпуса аккумуляторов, прокладки, трубы, фланцы, водонапорную арматуру, пленки, пленочные покрытия бумаги и картона, корпуса воздушных фильтров, конденсаторы, вставки демпфирующих глушителей, зубчатые и червячные колеса, ролики, подшипники скольжения, фильтры масляных и воздушных систем, рабочие детали вентиляторов, насосов, уплотнения, детали приборов и автоматов точной механики, кулачковые механизмы, детали телевизоров, магнитофонов, холодильников, стиральных машин, изоляцию проводов и кабелей. Отходы при производстве полипропилена и отработавшие изделия из него используют для повторной переработки.

**Полистирол** (ГОСТ 20282-86Е) относится к числу наиболее известных и широко применяемых пластмасс. Его макромолекула имеет следующую формулу:  $[-CH_2-CH(C_6H_5)-]_n$ .

Полистирол – твердый, жесткий, бесцветный, прозрачный аморфный полимер, легко окрашиваемый в различные цвета. Обладает высокой водостойкостью, хорошей химической стойкостью в растворах солей, кислот и щелочей. По сравнению с другими термопластами более стоек к радиации. Недостатками полистирола являются повышенная хрупкость при ударных нагрузках, склонность к старению, невысокая тепло- и морозостойкость. Интервал рабочих температур от -40 до +65 °С. Полистирол применяют для изготовления деталей радио- и электроаппаратуры, пред-



метов домашнего обихода, детских игрушек, трубок для изоляции проводов, пленок для изоляции электрических кабелей и конденсаторов, открытых емкостей (лотки, тарелки и др.), прокладок, втулок, светофильтров, крупногабаритных изделий радиотехники (корпуса транзисторных приемников), деталей электропылесосов (колодки, щелевые сопла, прокладки, ручки), мебельной фурнитуры, конструкционных изделий с антистатическими свойствами. Ударопрочным полистиролом (механическая смесь полистирола с каучуком) облицовывают пассажирские вагоны, салоны автобусов и самолетов. Из него изготавливают крупногабаритные детали холодильников, корпуса радиоприемников, телефонных аппаратов и др. Его применяют для изготовления деталей машин и аппаратов, непосредственно контактирующих с пищевыми продуктами (молоком и молочными продуктами, вином, коньяком, шампанским и др.), а также для тары и упаковки. Полистирол используют для изготовления пористых материалов.

В числе различных синтетических материалов широкое распространение получили так называемые газонаполненные пластики. Эти материалы разделяются на **пенопласты и поропласты**. У пенопластов микроскопические ячейки, наполненные газом, не сообщаются между собой, и плотность таких материалов, как правило, менее  $0,3 \text{ г/см}^3$ . Ячейки у поропластов сообщаются между собой, и их плотность несколько выше. Пенопласты и поропласты выпускаются на основе полистирола, поливинилхлорида и различных эфирных полимеров.

Пенопласт применяют в качестве теплоизоляционного слоя в конструкциях судовых трюмов, кузовов автофургонов, холодильных камер на объектах мясо-молочной и рыбной промышленности.

**Пенополистирол** получают из эмульсионного полимера прессовым и беспрессовым методами. Пенополистирол применяют для теплоизоляции холодильников и торгового оборудования. Для производства изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, используют обычно суспензионный полистирол. При получении пенополистирола прессовым методом (пенополистирол марок ПС-1 и ПС-4) используют эмульсионный тонкодисперсный полистирол, смешивают его с порообразующим компонентом, прессуют, а затем вспенивают в специальных обогреваемых камерах. Если же пенополистирол получают беспрессовым методом из блочно-суспензионного стирола, он называется стиропором. Его полимеризацию проводят при  $70^\circ\text{C}$  с непрерывным перемешиванием. Пенополистирол имеет структуру застывшей пены, он стоек



## Физическое и прикладное материаловедение

к действию влаги, агрессивных минеральных сред (кроме концентрированной азотной кислоты). Пенополистирол, полученный беспрессовым методом, обладает более высокой химической стойкостью. Устойчив он также и в биологическом отношении: не гниет, стоек к действию грибков и бактерий, не повреждается грызунами.

Прочность пенополистирола зависит от размера, формы и прочности стенок пор. Механические свойства беспрессового пенополистирола ниже, чем прессового.

Пенополистиролы могут работать при температурах до 60-75°C. Недостатком пенополистирола является присутствие в нем горючего порообразователя, например изопентана. Уменьшить или вовсе устранить эту опасность удастся путем введения антипиренов, например оксида сурьмы.

Пенополистирол применяется в различных отраслях промышленности как термо- и звукоизоляционный материал, в пищевой промышленности – для изоляции трюмов для хранения продуктов питания при температуре от +15 до -35°C. Коэффициент теплопроводности пенополистирола близок к коэффициенту теплопроводности воздуха. Благодаря хорошим амортизационным свойствам и малой плотности пенополистирол используют в качестве упаковочного материала.

**Пенопласт мипора** изготавливается на основе эмульсионных карбамидоформальдегидных олигомеров. Он обладает исключительно малой плотностью (не более 0,02 г/см<sup>3</sup>; разрушающее напряжение при сжатии 2,2-5,0 МПа). Коэффициент теплопроводности мипоры близок к коэффициенту теплопроводности воздуха и равен 0,023 Вт/(м·К). Мипора в 10 раз легче пробки, имеет хорошую стойкость против горения. При контакте с пламенем мипора обугливается, но не загорается. В мипоре газонаполненные ячейки не сообщаются между собой. Это позволяет использовать мипору в качестве теплоизоляционного материала. Недостатками мипоры являются большая хрупкость и водопоглощение. Для уменьшения хрупкости к мипоре добавляют глицерин, но даже это не всегда помогает. От проникновения влаги мипору защищают водонепроницаемыми пленками.

В последнее время в промышленности начинают все шире использовать армированные газонаполненные пластмассы, что позволяет сочетать малую плотность с высокой прочностью, т.е. повышать удельную прочность. Газонаполненные пластмассы армируют листами металла или листами более прочных газонаполненных пластмасс.



Пластмассы на основе **поливинилхлорида** (ГОСТ 5960-72, ГОСТ 9639-71, ГОСТ 9998-80, ГОСТ 16214-86, ГОСТ 16272-79) имеют хорошие электроизоляционные свойства. Они стойки к воздействию химикатов, не поддерживают горения, атмосферо-, водо-, масло- и бензостойки. Поливинилхлорид имеет химическую формулу  $[-\text{CH}_2-\text{CHCl}-]_n$ . Непластифицированный поливинилхлорид называется винипластом. Винипласты имеют высокую механическую прочность и упругость, но сравнительно малопластичны. Винипласты стойки к воздействию почти всех минеральных кислот, щелочей и растворов солей. Их недостатками являются склонность к ползучести, низкая ударная вязкость, малая теплоустойчивость, резкая зависимость от температуры.

Винипласт выпускается в виде листов, прутков, труб. Винипластовые детали хорошо механически обрабатываются и хорошо свариваются. Из него изготавливают трубы для транспортировки воды, агрессивных жидкостей и газов, коррозионностойкие емкости, защитные покрытия для электропроводки, детали вентиляционных установок, теплообменников, шланги вакуумпроводов, защитные покрытия для металлических емкостей, изоляцию проводов и кабелей. Поливинилхлорид используют для получения пенопластов, линолеума, искусственной кожи, объемной тары, товаров бытовой химии, вибропоглощающих материалов в машиностроении и на всех видах транспорта и т.д.

**Фторопласты** (ГОСТ 21000-81, ГОСТ 10007-80Е, ГОСТ 14906-77, ГОСТ 25428-82) – полимеры фторпроизводных этиленового ряда. Имеют прочность при растяжении 15-35 МПа, при изгибе 10-15 МПа; относительное удлинение при разрыве 250-350%. Наиболее широкое распространение получил фторопласт-4, или политетрафторэтилен (тефлон). Он имеет структурную формулу  $[-\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$ . Характеризуется высокой плотностью (2,1-2,3 г/см<sup>3</sup>), термо- и морозостойкостью. Интервал рабочих температур при эксплуатации изделий из фторопласта-4 составляет от -269 до +260°C. Пленка из него не охрупчивается даже в среде жидкого гелия. Фторопласт-4 имеет хорошие диэлектрические свойства и высокую коррозионную стойкость. По химической стойкости фторопласт-4 превосходит все известные материалы, включая золото и платину. Он стоек к воздействию всех минеральных и органических щелочей, кислот, органических растворителей, не набухает в воде, не смачивается жидкостями и вязкотекучими средами пищевых производств: тестом, патокой, вареньем и т.д. При температуре 260°C невзрывоопасен, негорюч, при непосредственном контакте не оказывает влияния на организм человека,



разрушается только под действием расплавленных щелочных металлов и элементарного фтора. Фторопласт-4 имеет низкий коэффициент трения и применяется для изготовления подшипников скольжения без смазки. Для уменьшения износа подшипников во фторопласт вводят 15-30 % наполнителя (графита, дисульфита молибдена, стеклянного волокна и др.).

Фторопласты широко применяются в электро- и радиотехнической промышленности, а также для изготовления химически стойких труб, кранов, мембран, насосов, подшипников, деталей медицинской техники, коррозионностойких конструкций, тепло- и морозостойких деталей (втулок, пластин, дисков, прокладок, сальников, клапанов), для облицовки внутренних поверхностей различных криогенных емкостей.

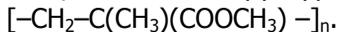
**Полиамиды** (ГОСТ 10589-87, ГОСТ 17648-83) включают группу известных термопластичных пластмасс (таких, как нейлон, капрон и др.). Макромолекула полиамида имеет структуру  $[-NH-(CH_2)_x-NH-CO-(CH_2)_y-CO-]_n$ , где  $x, y=2-10$ . Ориентированные полиамиды характеризуются высокой прочностью на растяжение (более 400 МПа), ударпрочностью, способностью к поглощению вибрационных нагрузок. Они имеют низкий коэффициент трения и могут использоваться в качестве подшипников как без смазки, так и при применении смазочных материалов. Полиамиды используют для изготовления конструкционных и электроизоляционных изделий, эксплуатируемых при температурах от  $-60$  до  $+100^\circ\text{C}$  (зубчатые передачи, уплотнительные устройства, втулки, муфты, подшипники скольжения, лопасти винтов, стойкие к действию щелочей, масел, жиров и углеводородов), технических изделий и товаров культурно-бытового назначения, антифрикционных покрытий металлов.

**Полиуретаны** - наиболее ценные и широко производимые промышленностью термопластичные полимеры. Полиуретаны содержат уретановую группу  $-NH-C(O)O-$ . Они характеризуются высоким модулем упругости, износостойкостью, низким коэффициентом трения, стойкостью к вибрациям, атмосферостойкостью, а также стойкостью к воздействию масла и бензина. Изделия из полиуретана можно эксплуатировать при понижении температуры до  $-60... -70^\circ\text{C}$ . Волокна из полиуретана мало гигроскопичны и имеют высокую химическую стойкость. Их используют для изготовления изоляции, фильтровальных и парашютных тканей.

Стекло органическое (**плексиглас**) (ГОСТ 9784-75Е, ГОСТ 10667-90Е, ГОСТ 15809-70Е, ГОСТ 17622-73Е) получают полимеризацией сложных эфиров метакриловой кислоты.



Обычно применяют полиметилметакрилат, имеющий структурную формулу



Этот термопласт оптически прозрачен (светопрозрачность до 92%), имеет низкую плотность, высокую атмосферостойкость, стоек к воздействию разбавленных кислот и щелочей, углеводородного топлива и смазок. Стекло органическое выпускается в виде листов толщиной до 25 мм. Его недостаток - низкая поверхностная твердость.

**Поликарбонат** - термопластичный полимер на основе дифенилолпропана и фостена, выпускаемый под названием дифлон. Поликарбонат характеризуется низкой водопоглощаемостью и газопроницаемостью, хорошими диэлектрическими свойствами, высокой жесткостью, теплостойкостью и химической стойкостью, не имеет запаха и вкуса, физиологически безвреден, бесцветен, прозрачен, хорошо окрашивается. Стоек к световому старению и действию окислителей даже при нагреве до 120°C. Это один из наиболее ударопрочных термопластов, что позволяет использовать его в качестве конструкционного материала, заменяющего металлы. Из поликарбоната изготавливают шестерни, подшипники, корпуса, крышки, клапаны и другие детали, сосуды для транспортировки фруктовых соков, молока, вин и т.д. Его можно использовать в криогенной технике для работы в среде жидких газов.

Физико-механические свойства поликарбонатов улучшаются при введении в них армирующих волокон. Например, при введении в поликарбонат стекловолокна (до 30 %) его модуль упругости при растяжении увеличивается в 3 раза, а твердость по Бринеллю – в 1,5 раза. Теплостойкость материала также увеличивается, а термический коэффициент линейного расширения снижается в 3 раза, усадка материала уменьшается в 2 раза.

Армированные поликарбонаты "Эстеран" нашли применение в производстве ответственных деталей машин, например подшипников качения, кулачков и т.д. Они сохраняют свои свойства и эксплуатационную надежность в интервале температур от -200 до +110°C, а также в вакууме.

В нашей стране кроме стеклонаполненного поликарбоната хорошо зарекомендовали себя наполненные стекловолокном полипропилен, полистирол и некоторые другие термопласты. Термопласты, армированные стекловолокном, имеют более высокие механические свойства и обеспечивают неизменность формы изделий в условиях повышенных температур. Производство таких термопластичных материалов с каждым годом растет на 25-30%.



## Физическое и прикладное материаловедение

Они применяются при изготовлении разнообразных деталей в электронной и электротехнической промышленности, оптическом и точном приборостроении, автомобилестроении, текстильном машиностроении и т.д.

### Термореактивные пластмассы (реактопласты)

Основу всякого реактопласта составляет химически за- твердевающая термореактивная смола – связующее вещество. Кроме того, в состав реактопластов входят наполнители, пласти- фикаторы, отвердители, ускорители или замедлители и раствори- тели. Наполнителями могут быть порошковые, волокнистые и гибкие листовые материалы. В качестве порошковых наполните- лей используют молотый кварц, тальк, графит, древесную муку, целлюлозу. К пластмассам с порошковыми наполнителями отно- сятся: фенопласты (ГОСТ 5689-79) и аминопласты (ГОСТ 9359-80). Из них изготавливают несилловые конструкционные и электроизо- ляционные детали (рукоятки, детали приборов, кнопки и г.д.), различные вытяжные и формовочные штампы, корпуса сборочных и контрольных приспособлений, литейные модели и другую осна- стку.

Фенопласты (бакелиты, фенолоформальдегидные смолы) изготавливаются в соответствии со схемой, приведенной на рис.6.

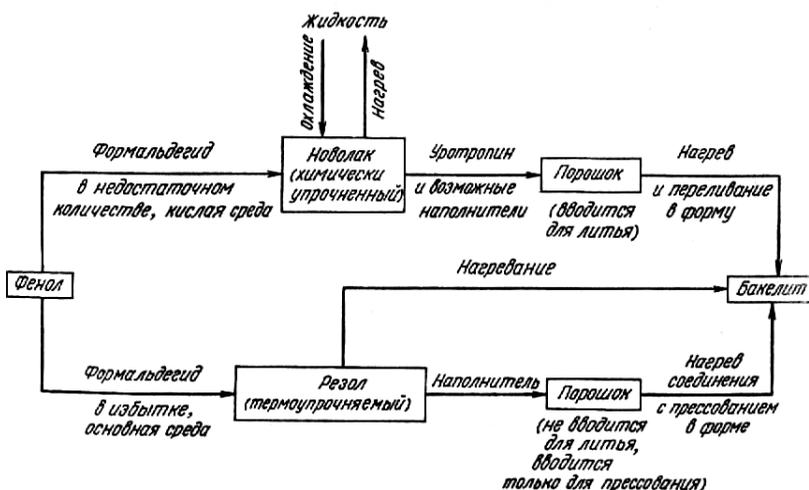
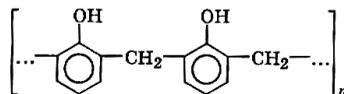


Рис.6. Схема изготовления фенопластов

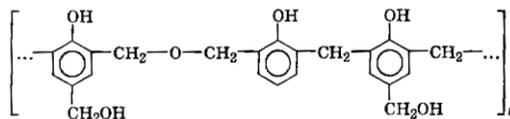


Фенопласты являются термоупрочняемыми пластмасами. Неупрочненные смолы получают при поликонденсации фенола с формальдегидом. Существует два основных типа фенолоформальдегидных смол: новолаки и резолы.

Неотвержденная новолаковая смола имеет структуру типа



а неотвержденная резоловая смола – типа



Для получения пластмассы с хорошими потребительскими свойствами в новолаки добавляют субстанцию (обычно уротропин), которая при нагревании разлагается с выделением формальдегида. Формальдегид, добавляемый к новолаковой смоле, образует упрочняющиеся гидроксиметильные группы.

Упрочнение термопластов в основном проводится в интервале температур 140-180°C, но благодаря соответствующим добавкам кислот некоторые резолы можно отвердить уже при 25°C и выше. Резолы получают в спиртовых средах, применяя избыток формальдегида. Продукт содержит гидроксиметиленовые группы. Во время нагревания происходит необратимое упрочнение (реакция образования сетчатой структуры), поэтому резолы прессуют в формах.

Упрочненные фенолоформальдегидные смолы чаще носят название **бакелитов**. Эта пластмасса хорошо обрабатывается механически инструментами для обработки металла и может подвергаться полированию. Бакелит из новолака имеет большую термостойкость (100-150°C), чем бакелит из резола, но худшие диэлектрические свойства. Бакелит трудногорюч, а после извлечения из пламени сразу гаснет. Горящий бакелит дает желтый цвет пламени, коптящий в зависимости от вида наполнителя. Остаток, извлеченный из пламени, твердый, разбухший, потрескавшийся и обугленный. В процессе горения выделяются фенол и формальдегид с характерным запахом.

Бакелит стоек к воздействию разбавленных кислот и щелочей, а также большинства органических растворителей. Для склеивания треснувших бакелитовых изделий можно применять

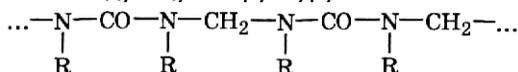


## Физическое и прикладное материаловедение

нитроцеллюлозные клеи или жидкие фенольные смолы.

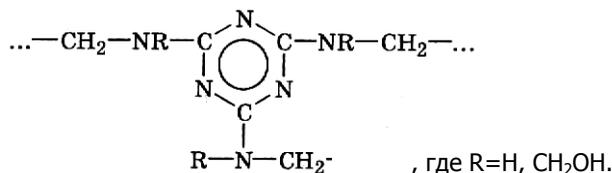
Из бакелита изготавливают изделия галантереи (пуговицы, пепельницы), электротехнические элементы (вилки, розетки), корпуса радио- и телефонных аппаратов, детали стиральных машин, защитные шлемы, корпуса аккумуляторов, плиты, лаки, клеи.

Аминопласты являются термоупрочняемыми пластмассами. К ним относятся карбамидоформальдегидные и меламиноформальдегидные смолы. Карбамидоформальдегидная неупрочненная смола имеет следующую структуру:



где R = H при мольном соотношении реагентов; R = H, CH<sub>2</sub>OH при избытке формальдегида.

Меламиноформальдегидная неупрочненная смола имеет структуру:



Неупрочненная смола получается при поликонденсации формальдегида с карбамидом (смола карбамидоформальдегидная) или меламином (смола меламиноформальдегидная). Эти смолы имеют реактивные группы —CH<sub>2</sub>OH, которые под влиянием нагрева (или кислотных катализаторов) способны к конденсации, в результате которой смолы упрочняются (приобретают пространственную сетчатую структуру).

Упрочненные аминопласты твердые и жесткие. Их можно полировать и механически обрабатывать инструментами по металлу, они имеют хорошие электроизоляционные свойства, легко окрашиваются. Теплостойкость упрочненных аминопластов около 100-120°C. Образец, внесенный в огонь, начинает гореть не более чем через одну минуту. Вынутый из пламени, он не гаснет, но горит медленно (в действительности горят наполнители, сама смола негорюча). Огонь имеет желтый цвет (меламиновая смола) или желтый с зеленовато-голубой каймой (карбамидная смола). Остаток после горения растресканный, разбухший и покрыт по краям характерным белым налетом. Во время горения отчетливо чувствуется запах формальдегида и карбамида.

Упрочненные аминопласты стойки к воздействию воды,



## Физическое и прикладное материаловедение

кислот (в том числе серной и азотной), щелочей и органических растворителей. Для склеивания таких аминопластов можно применять фенолоформальдегидные или карбаминоформальдегидные клеи. Из аминопластов изготавливают клеи для дерева, электротехнические детали (розетки, выключатели) и галантерею, тонкие покрытия для украшения, лаки (так называемые печные), пенистые материалы.

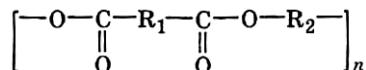
Реактопласты с волокнистыми наполнителями представляют собой композиции, состоящие из связующего (смолы) и волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка (волокниты), асбеста (асбоволокниты), стекловолокна (стекловолокниты).

**Волокниты** применяют для изготовления деталей с повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, работающих на изгиб и кручение (втулок, шкивов, маховиков и др.).

Асбоволокниты обладают хорошими фрикционными (тормозными) свойствами и теплостойкостью, но по водостойкости и диэлектрической проницаемости уступают пластмассам с порошковым наполнителем.

Стекловолокниты негорючи, стойки к действию ультрафиолетовых лучей, химически стойки, имеют стабильные размеры. Некоторые марки стекловолокнитов применяются для изготовления силовых электротехнических деталей в машиностроении, а также крупногабаритных изделий простых форм (кузовов автомашин, лодок, корпусов приборов и т.п.). Стекловолокниты имеют высокие физико-механические характеристики и применяются для изготовления деталей высокого класса точности и сложной конфигурации. Стекловолокниты могут работать при температурах от  $-60$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ , имеют прочность при разрыве  $80-500$  МПа.

В качестве связующих смол волокнитов и стекловолокнитов применяются полиэстеровые и эпоксидные смолы. Полиэстры (полиэстеровые, или полиэфирные смолы) имеют следующую структуру:



Полиэстры являются полимерами, полученными из основных кислот (например,  $\text{HOOC—R}_1\text{—COOH}$ ) и полигидроксильных спиртов (например,  $\text{HO—R}_2\text{—OH}$ ) путем поликонденсации. Если группы R не содержат кратных связей, то речь идет о насыщенном полиэстре, чаще термопластичном, иногда упрочняемом (например, в случае применения тригидроксильного спирта). Если



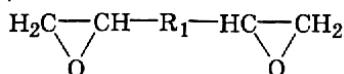
группы R содержат кратные связи, полиэстр является ненасыщенным и химически упрочняемым.

Перед отверждением смола имеет вид густого сиропа золотистого цвета. Отверждение проводят в форме при комнатной температуре после добавления инициатора (обычно перекись бензоила) в количестве около 4%. Механические свойства отвержденного продукта зависят от строения исходной смолы и способа ее отверждения. Изделие может быть гибким, эластичным или твердым и хрупким. Твердые изделия можно подвергать механической обработке инструментами по дереву, а также полировать.

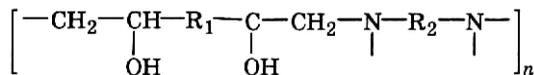
Термическая стойкость под напряжением отвержденных смол лежит в пределах 55-60°C, а без нагрузки превышает 150°C. Образец ламината (полиэстеровая смола со стеклотканью), помещенный в пламя, горит очень плохо. После извлечения из пламени чаще всего гаснет. После сгорания остается обугленный скелет стекловолокна.

Отвержденные полиэстры нерастворимы в органических кислотах, в ацетоне легко растрескиваются. Из полиэстров, упрочненных стекловолокном, изготавливают спасательные лодки, части автомобилей, мебель, корпуса планеров и вертолетов, гофрированные плиты для крыш, плафоны ламп, мачты для антенн, лыжи и палки, удочки, защитные каски и т. п. В виде текучих смол полиэстры применяют для заливки частей электронной аппаратуры, мумификации анатомических препаратов, изготовления лаков и т. п.

Эпоксидные смолы имеют следующую структуру:  
смола неотвержденная



смола отвержденная



Неотвержденные эпоксидные смолы получают реакцией поликонденсации эпоксиды (эпихлоргидрина) с дифенилолпропаном (дианом). Процесс отверждения является реакцией суммирования (полиприсоединения), в которой роль отвердителя играет полиамин. Характерной чертой эпоксидных смол является совершенная прилипаемость почти ко всем пластмассам, к металлам; они имеют хорошие механические и электрические свойства. Эпоксидные смолы служат для изготовления лаков, клеев, а также производства ламинатов.



Большую группу реактопластов составляют **слоистые пластмассы**, которые содержат листовые наполнители, уложенные слоями. В качестве наполнителей для слоистых пластиков используют материалы органического (бумагу, картон, хлопчатобумажные ткани, древесный шпон, ткани из синтетических волокон) и неорганического (асбестовую бумагу, стеклянную ткань, ткань из кварцевых или кремнеземных волокон) происхождения. В зависимости от вида наполнителя различают следующие слоистые пластики: гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, древесно-слоистые пластики. Связующими при производстве слоистых пластиков служат фенолоформальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические и некоторые другие смолы.

Свойства слоистых пластиков зависят от соотношения компонентов (наполнителя и связующего), характера подготовки наполнителя, режимов прессования и термообработки и других технологических факторов. Благодаря слоистому расположению армирующего наполнителя слоистые пластики обладают анизотропией механических, физических и диэлектрических свойств.

Механические свойства слоистых пластиков определяются прежде всего видом используемого наполнителя. Наибольшей механической прочностью обладают слоистые пластики на основе стеклянной ткани или стеклянных жгутов. Эти материалы, а также слоистые пластики на основе асболоволоконистых наполнителей имеют более высокую теплостойкость по сравнению с теплостойкостью пластиков на основе органических наполнителей.

Физические и диэлектрические свойства слоистых пластиков зависят в основном от типа используемого полимерного связующего. Пластик на основе бумаги – гетинакс – применяют в качестве электроизоляционного материала, работающего длительно при температурах от  $-65$  до  $+105^{\circ}\text{C}$ , а также как конструкционный и декоративный материал (ГОСТ 2718-74). Гетинакс широко применяют в электрических машинах, трансформаторах (в качестве высоковольтной изоляции) и других аппаратах, при производстве телефонной арматуры, в радиотехнике (для изготовления печатных схем). Из гетинакса изготавливают панели, щитки, прокладки, крышки, шайбы, малонагруженные изделия и т.д.

Древесно-слоистые пластики (ДСП) используют при изготовлении мебели, для внутренней облицовки пассажирских поездов, судов, самолетов, при строительстве – в качестве облицовочного материала. ДСП обычно изготавливают в форме плит или тонких листов. Их получают горячим прессованием лущеного дре-



весного шпона, пропитанного полимерным связующим. При производстве ДСП чаще используют березовый или буковый шпон, в качестве связующего используют водно-спиртовые растворы олигомеров. Древесно-слоистые пластики выпускают различных марок и маркируют ДСП-А, ДСП-Б, ДСП-В и т.д. Они различаются направлением волокон шпона в различных слоях. В ДСП-А – во всех слоях волокна шпона расположены параллельно (иногда четыре слоя с параллельным расположением волокон чередуются с одним слоем, повернутым на 20-25°). В ДСП-Б расположение слоев смешанное. Через каждые 5-20 слоев с параллельным расположением волокон укладывают слой, повернутый на 90°. В ДСП-В осуществляется звездообразная укладка слоев, при которой соседние слои волокон смещают на 30°. Максимальной прочностью в продольном направлении ( $\sigma_B=280$  МПа) обладает ДСП-А; ДСП-Б имеет прочность, одинаковую во взаимно перпендикулярных направлениях (140 МПа).

ДСП обладают хорошими антифрикционными свойствами. В некоторых случаях они заменяют высокооловянистую бронзу, баббит, текстолит. Химическая стойкость ДСП не очень высока, но выше, чем у обычной древесины. Теплостойкость ДСП достигает 140°С. Их недостатком является набухание, обусловленное поглощением воды.

Пластики на основе хлопчатобумажных тканей (ГОСТ 2910-74) – текстолиты – применяют для изготовления различных конструкционных деталей, электроизоляционного материала, вкладышей подшипников прокатного оборудования, прокладок, герметизирующих фланцевые соединения. Текстолитовые детали могут работать не только в воздушной среде, но и в масле, керосине или бензине и т.д. Текстолит производят в виде листов, плит, стержней и трубок. Температура эксплуатации изделий из текстолита от -60 до +60°С.

Стеклотекстолитами (ГОСТ 10292-74Е, ГОСТ 12652-74) называют слоистые пластики на основе тканых стекловолоконных материалов. Они характеризуются высокой тепло- и хладостойкостью, стойкостью к действию окислителей и других химически активных реагентов, высокими механическими свойствами. Стеклотекстолиты применяют для изготовления крупногабаритных изделий, радиотехнических и электроизоляционных деталей, длительное время работающих при температуре 200°С и кратковременно - при 250°С. Стеклопластики являются конструкционными материалами, применяемыми для изготовления силовых изделий в различных отраслях техники (несущих деталей летательных ап-



паратов, кузовов и кабин машин, железнодорожных вагонов, корпусов лодок, судов и т.п.).

## 7.2. Резины

Резинотехнические изделия получают при специальной термической обработке (вулканизации) прессованных деталей из сырой резины, являющейся смесью каучука с серой и другими добавками. Резина состоит из смеси каучука (основа), наполнителя (сажа, оксид кремния, оксид титана, мел, барит, тальк), мягчителя (канифоль, вазелин), противостарителя (парафин, воск) и агентов вулканизации (сера, оксид цинка).

Главным исходным компонентом резины, придающим ей высокие эластические свойства, является каучук. Каучуки бывают натуральные и синтетические. Натуральный каучук получают коагуляцией латекса (млечного сока) каучуконосных деревьев, растущих в Бразилии, Юго-Восточной Азии, на Малайском архипелаге. Синтетические каучуки (бутадиеновые, бутадиен-стирольные и др.) получают методами полимеризации. Впервые синтез бутадиенового каучука полимеризацией бутадиена, полученного из этилового спирта, осуществлен в 1921 г. русским ученым С.В.Лебедевым. Разработаны методы получения синтетических каучуков на основе более дешевого сырья, например нефти и ацетилена. Каучуки являются полимерами с линейной структурой. При вулканизации они превращаются в высокоэластичные редкосетчатые материалы – резины. Вулканизирующими добавками служат сера и другие вещества. С увеличением содержания вулканизатора (серы) (до 30-50%) получают твердую резину (эбонит), при насыщении серой до 10-15% – полутвердую резину. Обычно в резине содержится 5-8% серы. Для ускорения вулканизации вводят ускорители, например оксид цинка.

Кроме серы в состав резин входят наполнители, пластификаторы, противостарители и красители. Введение этих компонентов позволяет существенно менять специальные свойства резины, увеличивая ее износ-, морозо-, масло- и бензостойкость. Резиновые изделия часто армируют тканью или металлической сеткой. Для улучшения адгезии металлической арматуры к резине на поверхность металла наносят клеевую пленку.

Резина имеет высокие эластические свойства, высокую упругость и сопротивляемость разрыву. Кроме того, резина обладает малой плотностью, высокой стойкостью против истирания,



## Физическое и прикладное материаловедение

химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами. Совокупность химических, физических и механических свойств позволяет использовать резиновые материалы для амортизации, демпфирования, уплотнения, герметизации, химической защиты деталей машин, при производстве тары для хранения масла и горючего, различных трубопроводов (шлангов), для изготовления покрышек и камер колес автотранспорта, декоративных изделий и т.д. Номенклатура резиновых изделий чрезвычайно разнообразна. В зависимости от условий эксплуатации различают резины общего и специального назначения. Резины общего назначения применяют для изготовления камер и шин, ремней, транспортных лент, рукавов, изоляции кабелей и проводов, производства товаров народного потребления и др. Из резин специального назначения различают бензостойкие, морозостойкие, теплостойкие, стойкие к действию агрессивных сред. Нижней границей рабочих температур резин специального назначения является температура до  $-80^{\circ}\text{C}$ , резин общего назначения – до  $-50^{\circ}\text{C}$ . На рис.7-8 показаны резинометаллические детали и рукав высокого давления с металлической оплеткой.

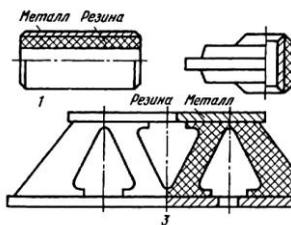


Рис.7. Резинометаллические детали: 1 – подшипник; 2 – пластинчатый амортизатор; 3 – амортизатор «ферма»

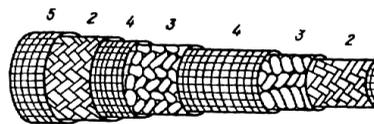


Рис.8. Конструкция рукава высокого давления с металлической оплеткой: 1 – внутренний резиновый слой; 2 – хлопчатобумажная оплетка; 3 – металлическая оплетка; 4 – резиновый слой; 5 – наружный резиновый слой

В последнее время актуальной проблемой является очистка территории наших городов от свалок старой резиновой продукции, которая в ходе длительного, иногда в течение десятков лет, хранения выделяет в атмосферу и в почву значительное количество вредных химических соединений.



### 7.3. Клеящие материалы

Клеями называют сложные вещества на основе полимеров, способные при затвердевании образовывать прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам. По сравнению с другими видами соединений (клепкой, сваркой, механическим креплением) клеевые соединения имеют ряд преимуществ. Клеи позволяют соединять разнородные материалы (металл, керамику, пластмассу, дерево) в различных сочетаниях. Клеевые швы атмосферостойки, не подвержены коррозии, позволяют обеспечивать герметичность соединений. Масса конструкции при клеевой сборке почти не увеличивается, отсутствуют снижающие прочность и являющиеся концентраторами напряжений отверстия под болты, заклепки, гвозди. Во многих случаях клеевое соединение металлических и неметаллических материалов является единственно возможным решением, обеспечивающим высокую прочность конструкции. Клеи могут выдерживать высокие и низкие температуры, сохраняя достаточную прочность соединения. Недостатки клеевых соединений: сравнительно невысокая теплоустойчивость при длительной эксплуатации и низкая прочность при несимметричном нагружении и неравномерном отрыве.

Работоспособность клеевых соединений зависит прежде всего от процессов адгезии и когезии. Адгезия характеризует прочность сцепления клеевой пленки со склеиваемой поверхностью, когезия – прочность собственно клеевого слоя.

Для приготовления клеев используют термопластичные или терморезистивные полимеры. Клеи на основе термопластичных полимеров дают менее прочные соединения и используются ограниченно, обычно для склеивания материалов, не подвергающихся тепловому воздействию (бумага, картон, ткани). С повышением температуры клеевой слой размягчается и склеенные поверхности разъединяются. Клеи на основе терморезистивных полимеров, содержащие также отвердители и ускорители процессов отверждения, наполнители и пластификаторы, дают более прочные соединения. Клеи этой группы могут быть холодного и горячего отверждения. Клеи холодного отверждения смешиваются с отвердителями и ускорителями непосредственно перед процессом склеивания. Клеи горячего отверждения приготавливаются на заводе-изготовителе, поставляются потребителю в готовом виде и могут храниться несколько месяцев.

К группе клеев на основе терморезистивных смол относят-



ся фенолоформальдегидные клеи. При наличии в их составе ускорителей процесса (например, сульфоконтакта) эти клеи отверждаются даже при комнатной температуре за несколько часов. К таким клеевым составам относятся клеи Б-3, Ф-9 и др. В тех случаях, когда применение ускорителя, обладающего кислотными свойствами, может привести к частичной деструкции склеиваемого материала (например, древесины, фанеры), рекомендуется вместо фенолоформальдегидного клея применять резорциноформальдегидный клей, например ФР-12.

Для склеивания изделий из древесины, работающих в условиях умеренной влажности, применяют клеи на основе водных растворов мочевиноформальдегидных смол, например клей КМ-12. В качестве ускорителей в этих клеях холодного отверждения используются хлорид аммония или хлорид цинка, а также слабые органические кислоты. Фенолоформальдегидные клеевые соединения водостойки.

На базе фенолоформальдегидных смол создана гамма универсальных клеев. В их число входят следующие: клей БФ (феноло-формальдегидная смола, модифицированная бутваром); клей ВК-32-ЭМ (продукт взаимодействия фенолоформальдегидной и эпоксидной смол); клей ВК-32-200 (фенолоформальдегидная смола и синтетический каучук); клей ВС-350 (фенолоформальдегидная смола, полиацеталь, полисилоксан) и др.

Из перечисленных групп клеев наибольшую прочность склейки до температур 140-150°C обеспечивают фенолоформальдегидно-эпоксидные клеи. Наиболее теплостойкими и достаточно прочными являются соединения, обеспечиваемые клеями ВК-32-250, ВС-350. Они могут длительное время работать при температурах 250-300°C.

Из клеев на основе терморезактивных полимеров наиболее широкое применение находят клеи на основе эпоксидных смол. Их применяют для склеивания различных металлов, металлических и неметаллических материалов. Клеи на эпоксидной основе могут работать в широком температурном интервале. Отдельные марки таких клеев выдерживают воздействие температур от -253 до +1000°C. Клеи на эпоксидной основе длительно сохраняют прочность в условиях эксплуатации, обеспечивают вакуумную плотность соединений и стойкость к циклическому температурному воздействию. Их преимуществами являются низкая (до 2%) усадка при отверждении, высокая адгезия к большинству конструктивных материалов и небольшой объем газовыделений в вакууме. Эти свойства позволяют широко использовать клеи на ос-



## Физическое и прикладное материаловедение

нове эпоксидных смол при склеивании холодильного и криогенного оборудования.

Эпоксидные клеи холодного отверждения применяют для склеивания древесины, многих пластмасс, керамики и резины с металлом. Эпоксидные клеи горячего отверждения применяют для склеивания металлических конструкций и изделий из стеклопластика. Эпоксидные клеи с наполнителем применяют в качестве шпатлевки, устраняющей дефекты металлического литья, а также неровности металлических, керамических и деревянных изделий.

По внешнему виду клеи обычно могут быть в жидком состоянии, в виде паст или пленок (фольг), часто армированных полиамидной тканью или другим синтетическим материалом. Широкое распространение получили пленочные клеи на эпоксидной основе, использование которых позволяет получать не только прочные клеевые соединения, но и дает существенные технологические преимущества. При применении пленочных клеев часто используют армирующие материалы – полиамидные, стеклянные и другие синтетические ткани.

Кроме клеев на эпоксидной основе широко используют кремнийорганические, алюмохромфосфатные клеевые композиции, а также полиуретановые (ПУ-2; ВК-20), резиновые и некоторые другие клеи.

Полиуретановая клеевая пленка газонепроницаемая, масло-, бензо- и водостойкая. Она обладает высокой адгезией и морозостойкостью, поэтому полиуретановые клеи используются также в качестве герметиков.

Для склеивания резиновых изделий между собой, а также металла с резиной применяются резиновые (каучуковые) клеи 88, Б-10, КР-5-18, лейконат. Резиновый клей удобен тем, что он вулканизируется на холоде, и это клеевое соединение обладает удовлетворительной прочностью и мало набухает в масле и бензине.

К числу наиболее распространенных герметиков для металлических изделий относится тиоколовый каучук (тиокол). Он вулканизируется при комнатной температуре. Вулканизатором в большинстве случаев является пероксид марганца, а активатором – дифенилгуанидин. Отвержденная пленка масло-, водо- и бензостойка, выдерживает длительное время при контакте с кислородом воздуха и сохраняет высокую прочность при температуре до 130°C.

Существенным недостатком тиоколового каучука является его низкая адгезия к металлу, поэтому при его использовании



требуется создавать подложку из резинового клея. Этот недостаток отсутствует у жидкого тиокола (герметик ВТУР), в состав которого входит диизоцианат.

Для герметизации отсеков ракет, самолетов и другой техники, работающей при температурах 150-250°C и не соприкасающейся с маслами и топливом, применяются полисилоксаны с отвердителями, обеспечивающими их отверждение при комнатной температуре (кремний- и оловоорганические соединения). Существенным недостатком этих герметиков является малая адгезия к металлу, даже в случае нанесения специального подслоя.

Для отсеков, работающих при 150-250°C и соприкасающихся с маслом и топливом, применяются фторорганические герметики. Полисилоксановые и фторорганические герметизирующие пленки не разрушаются при длительном воздействии на них кислорода и озона; они сохраняют эластичность при низких температурах (до -60°C); имеют высокую водостойкость.

Технологически удобны для использования в качестве герметика растворы феноло-формальдегидных смол, совмещенных с нитрильным каучуком, например ВГК-18. Этот герметик не требуется вулканизировать: он обладает удовлетворительной адгезией к металлическим поверхностям, а герметизирующая пленка сохраняет прочность до 100°C, обеспечивает достаточную прочность и обладает масло- и бензостойкостью.

На основе жидких полиуретановых, карбоксилатных, фторированных каучуков разработан способ герметизации вакуумированных узлов (пропускных) в криогенных условиях. В радиотехнике применяют галлиевые клеи (клеи-припои). Соединение, полученное с помощью такого клея, имеет хорошую тепло- и электропроводность, достаточно высокую прочность и эксплуатационную стабильность в интервале температур от -196 до +800°C.

Склеиваемые поверхности должны быть механически очищены, например наждачной бумагой, пескоструйной обработкой, и обезжирены (спиртом, ацетоном). Толщина пленки клея должна составлять

0,1-0,6 мм. Меньшая

толщина грозит нарушением сплошности пленки, большая – уменьшает прочность соединения.

#### **7.4. Лакокрасочные материалы**

Лакокрасочные материалы представляют собой многокомпонентные составы, в жидком состоянии наносимые на поверх-



## Физическое и прикладное материаловедение

ность изделий и высыхающие с образованием пленок, удерживаемых силами адгезии. Высохшие пленки называют лакокрасочными покрытиями. Назначение лакокрасочных покрытий – защита металлов от коррозии, дерева и тканей – от гниения и набухания. Кроме того, они служат декоративным целям, придавая изделиям желаемый внешний вид. В некоторых случаях покрытия могут иметь специальные свойства: электроизоляционные, теплозащитные, светостойкие и др. Защитные покрытия в несколько раз увеличивают срок службы аппаратуры, металлоконструкций и оборудования.

Основными требованиями, предъявляемыми к лакокрасочным покрытиям, являются высокая адгезия к защищаемым поверхностям; близкие значения температурных коэффициентов линейного расширения покрытия и металла; высокая плотность, беспористость, водо- и газонепроницаемость; высокая эластичность пленки при достаточной твердости и механической прочности; теплостойкость, химическая стойкость и светостойкость.

Качество и срок службы лакокрасочных покрытий зависят от их состава, природы окрашиваемого материала, подготовки поверхности, технологии и качества нанесения покрытия.

Основные компоненты лакокрасочных материалов – пленкообразователи, растворители и пигменты. Пленкообразователи сообщают лакокрасочным материалам способность к образованию пленки и определяют ее основные свойства. Пленкообразующими веществами могут быть высыхающие растительные масла, синтетические смолы и эфиры целлюлозы. Различают неотверждаемые термопластичные и отверждаемые термореактивные пленкообразователи.

Растворителями лакокрасочных материалов служат скипидар, уайт-спирит, ацетон, спирты. Растворители подбирают в зависимости от пленкообразующего вещества: для масел используют скипидар и уайт-спирит; для смол – спирты, ацетон и ароматические углеводороды типа бензола и толуола, для эфиров целлюлозы – ацетон. Растворители при сушке полностью улетучиваются. Для ускорения высыхания покрытий применяют каталитически действующие сиккативы, представляющие собой растворы оксидов или солей кобальта, цинка, свинца, марганца в растительном масле.

Пигменты (или красители) применяют для получения определенного цвета лакокрасочного материала. Одновременно пигменты улучшают адгезию, повышают антикоррозионные свойства и водостойкость пленок. По химическому составу они пред-



ставляют собой оксиды или соли металлов (охра, железный сурик, цинковые и титановые белила), порошки алюминия, цинка и элементарного углерода (графит, сажа). Используют также пигменты органического происхождения (пигмент алый и др.), придающие покрытиям красивые яркие тона.

Для удешевления лакокрасочных материалов в них добавляют наполнители. Наполнителями служат мел, каолин, тальк и другие вещества. Применение в качестве наполнителей слюды и асбеста способствует повышению термостойкости покрытий.

В зависимости от состава и назначения лакокрасочные материалы делятся на лаки, краски (в том числе эмали), грунты и шпаклевки. Лаком называют раствор пленкообразующих веществ в органических растворителях или в воде, образующий после высыхания твердую прозрачную однородную пленку. Лаки используют для получения прозрачных покрытий, защищающих поверхность от внешней среды. Иногда лаки наносят на слой краски для большего блеска покрытия.

Грунтами, шпаклевками и красками называют пигментированные лаки и олифы – высыхающие масла с добавкой сиккатива, являющегося катализатором высыхания. Краски, изготовленные на лаках, называют эмалями, а на олифах – масляными красками.

Грунты являются нижними слоями покрытия. Они обеспечивают прочную адгезию с окрашиваемой поверхностью. В качестве пигмента в грунтах применяют соли хромовой кислоты, свинцовый или железный сурик, цинковые белила и др.

Шпаклевкой называют густую и вязкую массу, состоящую из смеси пигментов с наполнителями в связующем веществе. Шпаклевки применяют для сглаживания неровностей поверхности изделий. Они имеют значительно большую вязкость, чем остальные лакокрасочные материалы за счет более высокой концентрации пигмента и наполнителя.

Надежность защиты поверхности изделий обычно достигается использованием многослойных покрытий. Сочетание слоев последовательно нанесенных лакокрасочных материалов различного целевого назначения (грунта, шпаклевки, краски, лака) называется системой покрытия. Общее число слоев составляет от 2-6 до 14. Толщина каждого слоя грунта, эмали, лака составляет 10-26 мкм, шпаклевки – до 1 мм. Выбор грунта производится с учетом окрашиваемого материала и покрывного материала. Покрывной материал выбирают в зависимости от условий эксплуатации и требуемого внешнего вида изделия.



## 7.5. Стекло

Стекло – это однородное аморфное вещество, получаемое при затвердевании расплава оксидов. В составе стекла могут присутствовать оксиды трех типов: стеклообразующие, модифицирующие и промежуточные. Стеклообразующими являются оксиды кремния, бора, фосфора, германия, мышьяка. К модифицирующим оксидам, введение которых понижает температуру плавления стекла и существенно меняет его свойства, относятся оксиды щелочных (Na, K) и щелочноземельных (Ca, Mg, Ba) металлов. Промежуточными являются оксиды алюминия, свинца, титана, железа. Они могут замещать часть стеклообразующих оксидов. Стеклообразующий каркас стекла представляет собой непрерывную пространственную решетку, в узлах которой расположены ионы, атомы или группировки атомов (рис.9). Химический состав стекла можно изменять в широких пределах. Поэтому и свойства стекла могут быть различными.

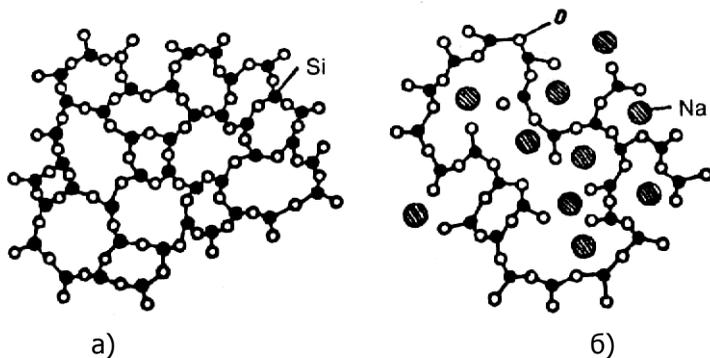


Рис.9. Схема непрерывной структурной сетки стекла:  
а – кварцевого; б – натрийсиликатного

По химическому составу в зависимости от природы стеклообразующих оксидов различают силикатное, алюмосиликатное, боросиликатное, алюборосиликатное и другие виды стекла.

В зависимости от содержания модификаторов стекло может быть щелочным и бесщелочным.

По назначению различают строительное (оконное, стеклоблоки), бытовое (стеклотара, посуда) и техническое (оптиче-



## Физическое и прикладное материаловедение

ское, электротехническое, химическое и др.) стекло. Структура и свойства стекла определяются его химическим составом, условиями варки, охлаждения и обработки.

Стекло – термопластичный материал, при нагреве оно постепенно размягчается и переходит в жидкость. Плавление происходит в некотором температурном интервале, величина которого зависит от химического состава стекла. Ниже температуры стеклования  $T_c$  стекло приобретает хрупкость. Для обычного силикатного стекла  $T_c=425-600^\circ\text{C}$ . Выше температуры плавления стекло становится жидкостью. При этих температурах стекломасса перерабатывается в изделия.

Плотность стекла составляет  $2,2-8,0 \text{ г/см}^3$ . Стекло высокой плотности содержит значительные количества оксидов свинца и бария. Стекло – жесткий, твердый, но очень хрупкий материал. Стекло хорошо сопротивляется сжатию ( $\sigma_{\text{сж}}=400-600 \text{ МПа}$ ), но характеризуется низким временным сопротивлением при испытаниях на растяжение (30-90 МПа) и изгиб (50-150 МПа). Более прочным является бесщелочное и кварцевое стекло.

Механические свойства стекла повышаются при термической и химической обработке. Термическая закалка стекла состоит в нагреве до температур, близких к точке размягчения, и быстром равномерном охлаждении поверхности в потоке воздуха или в масле. При этом в поверхностных слоях возникают напряжения сжатия, и прочность стекла возрастает в 2-4 раза. Для изготовления приборов, работающих при повышенном давлении, применяют бесщелочное стекло – триплекс.

Триплекс представляет собой комбинированное стекло, состоящее из двух и более закаленных слоев, склеенных прозрачной эластичной пленкой. Химическая обработка состоит в травлении поверхностного слоя раствором плавиковой кислоты с уничтожением поверхностных дефектов. Еще больший эффект достигается при комбинированной химико-термической обработке.

Важнейшим свойством стекла является прозрачность в диапазоне длин волн видимого света. Обычное листовое стекло пропускает до 90%, а отражает около 8% и поглощает около 1% видимого света. Ультрафиолетовые лучи почти полностью поглощаются оконным стеклом.

Стекло имеет высокую химическую стойкость в агрессивных средах (за исключением плавиковой кислоты и щелочей). Вода постепенно разрушает стекло вследствие образования щелочных растворов. Чем выше температура и концентрация ще-



## Физическое и прикладное материаловедение

лочных оксидов в стекле, тем сильнее проявляется действие воды. Стекло как технический материал широко используется в разных областях техники и народного хозяйства. Это объясняется благоприятным сочетанием физико-химических и механических свойств, возможностью изменять эти свойства в широких пределах в зависимости от состава стекла и способов термического воздействия, а также способностью стекла легко поддаваться разным способам горячей и холодной обработки.

Кварцевое стекло, состоящее практически из чистого кремнезема (99%  $\text{SiO}_2$ ), в зависимости от способа получения бывает двух типов: оптически прозрачное и непрозрачное. Кварцевое стекло отличается от всех известных стекол высокими физико-химическими свойствами: высокой жаростойкостью ( $1400^\circ\text{C}$ ), низким температурным коэффициентом линейного расширения  $[(0,5-0,55)10^{-6}\text{K}^{-1}]$ , высокой термической (выдерживает перепад температур  $800-1000^\circ\text{C}$ ) и химической стойкостью, особенно к действию кислот (кроме плавиковой) и воды. Кварцевое стекло имеет высокие диэлектрические характеристики, прозрачно в видимой, ультрафиолетовой и частично инфракрасной областях. Кварцевое стекло, имеющее особенно высокую термическую и химическую стойкость в сочетании с низким температурным коэффициентом линейного расширения, применяется для изготовления тиглей, термопар, электровакуумных изделий, химически стойкой тары, труб, лабораторной посуды. Для защиты деталей от коррозии при температурах до  $500-600^\circ\text{C}$  в машиностроении применяют стеклоэмали.

Пеностекло получают вспениванием жидкой стекольной массы при высокой температуре за счет введения газотвердых веществ: измельченного известняка, мела, угля. Пеностекло имеет малую плотность, низкую теплопроводность и характеризуется высоким звукопоглощением. Это негорючий, термостойкий и химически стойкий материал.

Стеклокристаллические материалы (ситаллы) получают из стекла путем его полной или частичной кристаллизации. Название «ситаллы» образовано из слов «стекло» и «кристаллы». Ситаллы иногда называют стеклокерамикой. Содержание кристаллической фазы в ситаллах может составлять до 95%. Размер кристаллов обычно не превышает 1-2 мкм.

Ситаллы – плотные, непрозрачные, газонепроницаемые, жесткие и твердые материалы. Их механическая прочность в 2-3 раза выше, чем прочность стекла. Они хорошо сопротивляются абразивному износу. Сочетание низкого температурного коэффи-



циента линейного расширения и высокой механической прочности придает им высокую термостойкость. Ситаллы характеризуются высокой химической стойкостью к действию кислот и щелочей и не подвержены коррозии при нагреве до высоких температур. Ситаллы совершенно не поглощают влагу.

Благодаря сочетанию легкости, прочности, твердости и технологичности ситаллы находят широкое применение в машиностроении. Из них изготавливают подшипники скольжения, работающие без смазки при температуре до 550°C, поршни и детали выхлопа двигателей внутреннего старания, химическую аппаратуру, фильтры для вытягивания синтетических волокон, рабочие колеса и лопатки насосов, перекачивающих агрессивные жидкости с абразивами. Ситаллы используют в качестве жаро- и износостойких эмалей для защиты металлических деталей. Ситалловые эмали могут работать при температурах до 800-900°C.

## 7.6. Древесина

Древесина – ценнейшее промышленное сырье. Большая потребность в древесине во многих областях техники объясняется ее свойствами, которые характеризуют древесину как важный конструкционный материал для строительства, горнодобывающей промышленности, железнодорожного транспорта, энергетики и т.д. Благодаря таким технологическим свойствам, как легкость обработки резанием и окончательной доводки поверхности изделия, а также натуральным декоративным достоинствам, древесина – незаменимый материал, особенно в мебельной промышленности и столярном деле. Химический состав древесины делает ее необходимым химическим сырьем для целлюлозно-бумажной промышленности и производства древесных пластиков.



## 7.6.1. Стрoение и химический состав древесины

В процессе роста дерева по периметру ствола ежегодно возникают слои клеток, образующих годовые слои, причем слой, нарастающий раньше (весенний), более мягкий и более светлый, чем последующие слои, нарастающие летом и осенью, – более твердые и темные. С течением времени внутренние слои утолщаются и твердеют, образуя ядро – наиболее ценную часть дерева. Наружные годовые слои остаются большей частью мягкими, образуя заболонь (рис.10). Процесс роста ствола происходит главным образом в находящемся непосредственно за корой тонком слое, называемом мезгой. Кора образует наружный, защитный слой дерева. Остальная часть ствола исполняет главные механические функции, а именно, удерживает дерево в вертикальном положении, а также противодействует естественным нагрузкам (ветер, снег). Главный элемент структуры древесины – клетки, длина клеток составляет обычно 2-4 мм, а размер в поперечнике 20-40 мкм. Стенки клеток являются композитом со сложной структурой. Микроволокна композита,

характеризующиеся высокой прочностью, построены из кристаллической целлюлозы и составляют – 45% от массы стенок клеток. Целлюлоза является полимером  $(C_6H_{10}O_5)_n$  со степенью полимеризации  $\sim 10^4$ . Микроволокна целлюлозы составляют основу лигнина и гемицеллюлозы. Лигнин – некристаллический полимер, в то время как гемицеллюлоза – полимер такого же состава, что и целлюлоза, но с меньшей степенью полимеризации и частично кристаллической структурой. Лигнин и гемицеллюлоза составляют 20% массы стенок клеток, 10% вода, 5% – побочные компоненты, т.е. смолы, дубильные вещества, жиры, а также минеральные соли, остальное – целлюлоза. Побочные компоненты придают древесине цвет и запах, а иногда также стойкость к вредителям.

В состав отдельных органических веществ древесины входят углерод, кислород, водород и азот. Доля этих элементов в сухой древесине составляет, %: углерод – 50; кислород – 43; водород – 6,1 и азот – 0,12.

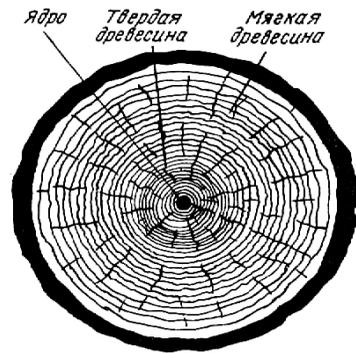


Рис.10. Сечение пня



Микроструктура древесины складывается из большого количества длинных, плотных трубчатых клеток, наполненных водой или растительным соком. Целлюлоза, соединяясь с гемицеллюлозой, образует каркасное вещество клеточных стенок, насыщенные лигнином. Важным компонентом древесины являются также минеральные вещества, такие как соли калия, натрия, кальция и угольной, фосфорной и кремниевой кислот. Содержание этих компонентов в древесине переменное и составляет в среднем 0,2-1,7%. В большем или меньшем количестве находятся в древесине также побочные вещества, такие как смолы, воск, жиры, красители, дубильные вещества, алкалоиды и др.

Очень существенным компонентом древесины является вода. Различают связанную и свободную воду. Около 25-30% влаги содержится в древесине в связанном виде и очень трудно поддается удалению. Остальная влага, заполняющая межклеточное пространство, легко выпаривается во время сушки.

Дерево, насыщенное водой, легко отдает ее воздуху, пересушенное дерево наоборот, поглощает влагу из воздуха. Высыхание и увлажнение особенно интенсивно происходит в основных сечениях древесины. Растущее дерево очень быстро впитывает воду, причем количество ее зависит не только от вида дерева, но и от времени года. Например, оптимальное содержание воды в растущей сосне или ели составляет 80%, в березе 70%. При транспортировке по воде (сплав) влажность дерева повышается еще больше. Такую древесину называют мокрой.

При длительном хранении на складе насыщение древесины водой стабилизируется, достигая определенного содержания в условиях окружающего воздуха. В зависимости от климата и времени года влажность древесины, находящейся на воздухе, составляет 15-20%. Высушенная древесина носит название воздушно-сухой.

#### 7.6.2. Физические и механические свойства древесины

Одним из важнейших свойств древесины является ее усадка. Линейные размеры древесины уменьшаются в процессе сушки, а противоположный процесс – так называемое растрескивание – идет при поглощении влаги из воздуха. Эти явления происходят при изменении содержания связанной воды (насыщающей), а содержание свободной (капиллярной) воды не влияет на изменение объема древесины. Величина объемной усадки приблизительно равна объему связанной (насыщающей) воды, от данной древесины при сушке.



Неодинакова величина усадки при сушке в направлениях оси, лучей и по окружности. Эти величины наименьшие в направлении оси древесины (0,12-0,36%), выше в направлении лучей (3-8%) и самые высокие по окружности (6-13%). Разная линейная усадка в направлении лучей и по окружности вызывает коробление досок и изменение формы поперечного сечения. Более быстрая и большая усадка по окружности, чем вдоль лучей, при сушке является главной причиной растрескивания древесины. Растрескивание легче происходит в более толстых сечениях. На рис.11 показано разное деформирование, возникающее в результате неодинаковой усадки по сечению ствола дерева.

Плотность древесины (собственная масса) зависит от степени ее влажности и пористости. В связи с этим различают плотность свежесрубленной, воздушно-сухой и полностью сухой древесины.

Механические свойства древесины зависят от направления действия силы по отношению к волокнам. Различают прочность древесины вдоль и поперек волокон. Наиболее существенными являются прочность при сжатии, изгибе и растяжении. Разница в прочности отдельных пород древесины является следствием их различной плотности. Несмотря на то, что прочность при растяжении древесины значительна, близка к прочности некоторых цветных металлов, например некоторых бронз и латуней, в практике избегают применять деревянные элементы, работающие на растяжение, учитывая малую прочность древесины, вызванную напряжениями среза и сжатия в месте закрепления. Прочность древесины при сжатии вдоль волокон в 3 раза меньше, чем при растяжении.

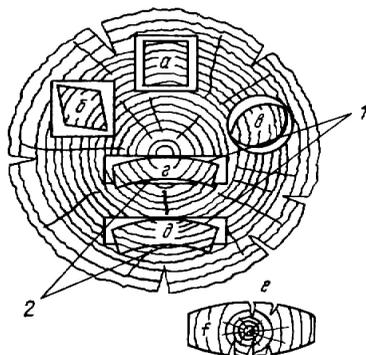


Рис.11. Дефекты древесины и трещины, возникающие в результате неоднородного скручивания в разных направлениях во время обработки дерева: а, б, в – деформация в продольном сечении; г – коробление доски, вырезанной из ядра дерева; д – деформация дерева из заболонной части; е – образование трещин; 1 – «правая» сторона доски (от стороны сердцевины); 2 – «левая» сторона доски (от внешней стороны пня)



## Физическое и прикладное материаловедение

Одной из важных характеристик, определяющих пригодность древесины для использования в промышленности, является ее твердость. Твердость древесины увеличивается по мере роста ее плотности.

**Виды древесины.** Древесина умеренной климатической зоны состоит в основном из хвойных и лиственных деревьев. Древесина хвойных деревьев характеризуется относительно простым строением в сравнении со строением лиственных деревьев. Это равномерное строение, с единичными и очень мелкими каналами, составляющими более 90% общего объема; в то же время отсутствуют сосуды и древесные волокна. Лучи сердцевин в основном незаметны. Годовые слои в поперечном сечении ствола четко обозначены и неоднородны. Особенность некоторых хвойных деревьев - наличие смол (сосна, лиственница, ель).

Древесина лиственных деревьев имеет очень сложное анатомическое строение. Она состоит из большого количества характерных элементов, образующих структуру древесины. Основные элементы - волокна древесины. Лучи сердцевин характеризуются большим разнообразием форм. Характерная черта некоторых видов лиственных деревьев (например, дуба, вяза, ясеня, белой акации) – хорошо видимые кольца. Остальные виды лиственных деревьев большей частью не имеют ядра древесины (например, береза, бук, ольха, осина, граб, клен, явор), у некоторых видов, имеющих ядро древесины (например, тополь, рябина, верба, орех, яблоня, груша), годовые кольца плохо видимые или неразличимые.

Применяемая в деревообрабатывающей промышленности, главным образом в мебельной, древесина субтропической климатической зоны (например, орех, красное дерево, палисандр, эбеновое дерево) имеет такое же строение, как у лиственных деревьев. Для экзотической древесины характерна интенсивная окраска самого ядра, поэтому эта древесина имеет эстетические достоинства при хороших механических и эксплуатационных свойствах. Примером такой древесины может быть гваяк, получаемый из гваякового дерева, растущего в Центральной Америке. Это вечнозеленое низкое дерево с перистыми листьями. Именно это дерево используется в судостроении для изготовления подшпикников корабельных валов.

**Изделия из древесины.** Торговая древесина делится на:  
- круглую древесину (окоренную) необработанную, например кругляки лесопилки, строительные, шахтные столбы, балансовая древесина;



## Физическое и прикладное материаловедение

- круглую обработанную древесину, например пиломатериалы (доски, бревна, брусы), паркет и клепки, шпалы и другую дровяную древесину.

Из древесины производят следующие материалы.

- Фанеры – тонкие древесные плиты (толщиной 0,4-3,0 мм), полученные при внецентренном или окружном срезании различных пород круглой древесины, благодаря чему обычно получают материалы с эффектными послойными узорами, цветом и блеском.

- Клееные фанеры – плиты, склеенные из нечетного количества фанерных листов, причем волокна в прилегающих слоях находятся под прямым углом. Физические и механические свойства клееной фанеры зависят от породы древесины, качества фанерных слоев, толщины и состава фанеры, вида клея и способа склеивания. По стандарту различают сухостойкие, полуводостойкие и водостойкие. Толщина краевой клееной фанеры составляет 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18 и 20 мм, длина 1120-2440 мм, а ширина 650-2440 мм.

- Древесно-волоконистые плиты – плиты, изготовленные из древесных волокон с добавлением или без добавления химических веществ. Они делятся на мягкие (пористые) плотностью менее  $400 \text{ кг/м}^3$ , полутвердые плотностью  $400-800 \text{ кг/м}^3$ , твердые плотностью более  $800 \text{ кг/м}^3$  и очень твердые плотностью более  $900 \text{ кг/м}^3$ . Мягкие плиты имеют толщину 9,5-25 мм, остальные – 2,4-6,4 мм. По применению древесно-волоконистые плиты делятся на плиты общего назначения и специального (водостойкие, грибоустойкие, насекомостойкие и негорючие). Применяются также в качестве декоративных или звукозащитных материалов.

- Костровые плиты – стружечно-костровые, полученные при склеивании синтетическим клеем под давлением льняных и конопляных костров, а также древесной стружки или опилок. Толщина плит составляет 8-50 мм, а плотность  $300-740 \text{ кг/м}^3$ . В зависимости от способа изготовления и окончательной обработки различаются прессованные, штампованные, одно-, двух- и пяти-слойные, полные и пустотелые, с натуральной, облагороженной и фанерной поверхностью.

- Плиты стружечно-цементные – это строительные плиты, получаемые из непромокаемой пропитанной (например, хлоридом кальция) древесной стружки и цемента, размерами  $2000 \times 500$  мм и различной толщины.

- Древесно-стружечные плиты – плиты из мелкой древесной стружки толщиной 0,05-0,6 мм, шириной 1-6 мм и длиной



## Физическое и прикладное материаловедение

200-500 мм, полученной из округлой древесины или еловых, пихтовых, сосновых, тополиных, осиновых и липовых щепок. Древесно-стружечные плиты характеризуются легкостью, мягкостью, эластичностью, воздухопроницаемостью, имеют также хорошие теплоизоляционные свойства. В зависимости от назначения плиты делятся на упаковочные и строительные. Применяются также в качестве обоев.

- Другие материалы, например лигнофол (слоистый материал в виде плит, изготовленный из водостойкой фанеры, склеенной синтетическим клеем под давлением), лигностон (древесина, упрочненная прессованием под давлением до 40 МПа при температуре 70-160°C), щепки (размельченная древесина или отходы лесопильного производства) и мягкая древесина, применяемые в производстве пластмасс и взрывчатых материалов.

### 7.7. Хладостойкие неметаллические материалы

Неметаллические материалы в качестве конструкционных материалов служат важным дополнением к металлам, используемым в технике низких температур.

#### 7.7.1. Пластмассы

В основе неметаллических материалов лежат полимеры. Ранее отмечалось, что полимеры - это химические соединения, представляющие собой длинные цепные молекулы, состоящие из многочисленных последовательно соединенных звеньев одинакового строения. По фазовому составу полимеры представляют собой системы, состоящие из кристаллических и аморфных областей.

В технике низких температур широко используют термопластичные и терморезистивные пластмассы, клеящие материалы, хладостойкие резины.

Для работы в криогенных условиях применяют стеклопластики, представляющие собой высокопрочные композиционные материалы на основе эпоксидной смолы и высокомодульных стеклянных волокон различного плетения (рис.12). В качестве армирующего материала при производстве хладостойких стеклопластиков применяют волокно диаметром 6-7 мкм из бесщелочного алюмоборосиликатного стекла, имеющего высокие механическую прочность и модуль упругости, хорошие адгезионные свойства и



малую плотность.

Связующее пропитывает стеклянный каркас и после отверждения склеивает между собой отдельные волокна и слои наполнителя, обеспечивая их монолитность и совместную работу в изделии. Высокие физико-механические свойства стеклопластиков обусловлены прочным сцеплением между стеклянными волокнами и полимерным связующим. Эпоксидные смолы, обладая высокой адгезией к стеклянным волокнам и малой усадкой при отверждении, сохраняют монолитность композиции в условиях криогенных температур.

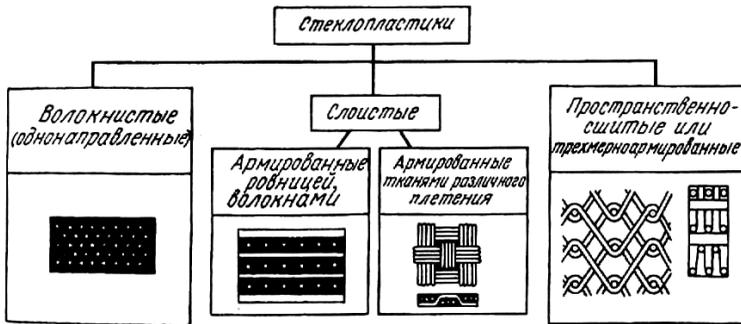


Рис.12. Классификация хладостойких стеклопластиков по укладке арматуры

Стеклопластики широко применяют в ракетной и космической технике. Благодаря тому, что основные компоненты высокопрочных стеклопластиков -эпоксидная смола и стекло - не реагируют с жидким водородом, их применяют для изготовления топливных баков. Стеклопластиковые трубопроводы незаменимы в тех случаях, когда необходима хорошая теплоизоляция в сочетании с высокой коррозионной стойкостью.

### 7.7.2. Клеящие материалы

Клеевые соединения используют как при низких климатических температурах, так и в условиях глубокого холода. Их применяют в строительных конструкциях в судостроении, в автомобильной и авиационной промышленности, ракетно-космической технике и др. Эпоксидные клеи используют для получения сборного железобетона в гидротехническом строительстве, мостостроении, промышленном и гражданском строительстве. При мон-



## Физическое и прикладное материаловедение

таже пролетов мостов клеи наносят на стыкуемые поверхности, элементы соединяются и дается натяжение сквозной металлической арматуры. После отверждения клея производится монтаж очередного элемента. Хотя несущая способность моста обеспечивается в основном за счет предварительно напряженной арматуры, использование клея вместо так называемого сухого стыка или стыка на цементном растворе дает существенные преимущества. Темпы монтажа возрастают на 30-40%, трудоемкость снижается в 1,8-2 раза, значительно повышается качество стыков. С применением клеевой технологии изготовлены мосты через такие крупные реки, как Днепр, Ока, Москва и др.

Эпоксидные клеи вводят в трещины железобетонных конструкций, что позволяет отказаться от их полной замены, например при восстановительных работах в районах землетрясений. Сочетание клеев и традиционных видов крепления – болтов, винтов и сварки – перспективно для металлических ферм и вантовых конструкций. При этом улучшается работа соединения на неравномерный отрыв и повышается надежность в случае пожара.

Авиационная техника широко использует различные клеи для склеивания элементов конструкций из стеклотекстолитов, органических и силикатных стекол, для крепления к металлу теплоизоляционных материалов, резины, пластмасс и других материалов.

В самолетостроении применяют композиционные материалы – преимущественно угле- и боропластики с эпоксидным связующим в клееных конструкциях, повышающих прочность и снижающих массу изделий. В качестве конструктивных клеев в авиационной технике обычно используют пленочные, а также жидкие клеи на основе модифицированных эпоксидных и фенолкаучуковых полимеров.

Большое применение находят клеи в ракетной технике. В настоящее время нет ни одной ракеты, ни одного космического летательного аппарата, где бы не использовались клеевые соединения. Клеи выдерживают очень высокие температуры и глубокое охлаждение, сохраняя при этом достаточную прочность. Их применяют для крепления теплоизоляции резервуаров криогенных жидкостей, топливных баков ракет и космических летательных аппаратов. Клеевые составы используют для крепления слоя теплоизолирующего пенопласта к цистернам для хранения и транспортировки природного газа.

Для соединения различных материалов в радиоэлектронной аппаратуре применяют галлиевые клеи, которые называются



также клеями-припоями. Соединения, получаемые на основе этих клеев, имеют высокие теплопроводность и электропроводность, достаточно высокую механическую прочность, повышенную стабильность размеров в процессе эксплуатации, выдерживают воздействие температур от  $-196$  до  $800^{\circ}\text{C}$ . Эти клеи отверждаются при комнатной температуре.

При электромонтажной пайке радиоэлектронной аппаратуры возможно нарушение режима работы термочувствительных элементов. Для монтажа термочувствительных полупроводниковых приборов применяют токопроводящие клеи – контактолы. С их помощью выполняются внутренние соединения в труднодоступных для пайки местах, крепление активных элементов на микроплатах, восстановление проводящих участков печатных плат и др.

## 8. КЕРАМИЧЕСКИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 8.1. Классификация керамики

Керамика относится к основным материалам, оказывающим определяющее влияние на уровень и конкурентоспособность промышленной продукции. Это влияние сохранится и в ближайшем будущем. Войдя в технику и технологию в конце 60-х годов XX века, керамика произвела настоящую революцию в материаловедении, за короткое время став, по общему мнению, третьим промышленным материалом после металлов и полимеров. Керамика была первым конкурентоспособным по сравнению с металлами классом материалов для использования при высоких температурах. Основными разработчиками и производителями керамических материалов являются США и Япония.

Исследование, проведенное Национальным бюро стандартов США, показало, что использование керамических материалов позволило в 2000 г. осуществить экономию ресурсов страны в размере более 3 млрд. долларов. Ожидаемая экономия была достигнута прежде всего за счет использования транспортных двигателей с деталями из керамики, керамических материалов для обработки резанием и оптокерамики для передачи информации. Помимо прямой экономии применение керамики позволит снизить расход дорогих и дефицитных металлов: титана и тантала в конденсаторах, вольфрама и кобальта в ре-



## Физическое и прикладное материаловедение

жущих инструментах, кобальта, хрома и никеля в тепловых двигателях.

Керамическая технология предусматривает следующие основные этапы: получение исходных порошков, консолидацию порошков, т.е. изготовление компактных материалов, их обработку и контроль изделий.

При производстве высококачественной керамики с высокой однородностью структуры используют порошки исходных материалов с размером частиц до 1 мкм. Процесс получения столь высокой степени дисперсности требует больших энергозатрат и является одним из основных этапов керамической технологии.

Измельчение производится механическим путем с помощью мелющих тел, а также путем распыления измельчаемого материала в жидком состоянии, осаждением на холодных поверхностях из парогазовой фазы, виброкавитационным воздействием на частицы, находящиеся в жидкости, с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и другими методами. Для сверхтонкого помола (частицы менее 1 мкм) наиболее перспективны вибрационные мельницы, или аттриторы.

Консолидация керамических материалов состоит из процессов формования и спекания. Различают три основные группы методов формования.

1. Прессование под действием сжимающего давления, при котором происходит уплотнение порошка за счет уменьшения пористости.

2. Пластичное формование выдавливанием прутков и труб через мундштук (экструзия) формовочных масс с пластификаторами, увеличивающими их текучесть.

3. Шликерное литье для изготовления тонкостенных изделий любой сложной формы, в котором для формования используют жидкие суспензии порошков.

При спекании отдельные частицы порошков превращаются в монолит и формируются окончательные свойства керамики. Процесс спекания сопровождается уменьшением пористости и усадкой.

Применяют печи для спекания при атмосферном давлении, установки горячего изостатического прессования (газостаты), прессы горячего прессования с усилием прессования до 1500 кН. Температура спекания в зависимости от состава может составлять до 2000-2200°C.

Часто применяются совмещенные методы консолидации, сочетающие формование со спеканием, а в некоторых случаях –



синтез образующегося соединения с одновременным формованием и спеканием.

Обработка керамики и контроль являются основными составляющими в балансе стоимости керамических изделий. По некоторым данным, стоимость исходных материалов и консолидации составляет всего лишь 11% (для металлов 43%), в то время как на обработку приходится 38% (для металлов 43%), а на контроль 51% (для металлов 14%). К основным методам обработки керамики относятся термообработка и размерная обработка поверхности. Термообработка керамики производится с целью кристаллизации межзеренной стеклофазы. При этом на 20-30% повышаются твердость и вязкость разрушения материала.

Большинство керамических материалов с трудом поддается механической обработке. Поэтому основным условием керамической технологии является получение при консолидации практически готовых изделий. Для доводки поверхностей керамических изделий применяют абразивную обработку алмазными кругами, электрохимическую, ультразвуковую и лазерную обработку. Эффективно применение защитных покрытий, позволяющих залечить мельчайшие поверхностные дефекты – неровности, риски и т.д.

Для контроля керамических деталей чаще всего используют рентгеновскую и ультразвуковую дефектоскопию. С учетом того, что большинство керамических материалов имеет низкую вязкость и пластичность и соответственно низкую трещиностойкость, для аттестации изделий применяют методы механики разрушения с определением коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ . Одновременно строят диаграмму, показывающую кинетику роста дефекта. Прочность химических межатомных связей, благодаря которой керамические материалы обладают высокой твердостью, химической и термической стойкостью, одновременно обуславливает их низкую способность к пластической деформации и склонность к хрупкому разрушению.

Возможны два подхода к повышению вязкости разрушения керамических материалов. Один из них традиционный, связанный с совершенствованием способов измельчения и очистки порошков, их уплотнения и спекания. Второй подход предполагает торможение роста трещин под нагрузкой. Существует несколько способов решения этой проблемы. Один из них основан на том, что в некоторых керамических материалах, например в диоксиде циркония  $ZrO_2$ , под давлением происходит перестройка кристаллической структуры. Исходная тетрагональная структура  $ZrO_2$  перехо-



дит в моноклинную, имеющую на 3-5% больший объем. Расширяясь, зерна  $ZrO_2$  сжимают трещину, и она теряет способность к распространению (рис.13,а). При этом сопротивление хрупкому разрушению возрастает до  $15 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ . Второй способ (см.рис.13,б) состоит в создании композиционного материала путем введения в керамику волокон из более прочного керамического материала, например карбида кремния  $SiC$ . Развивающаяся трещина на своем пути встречает волокно и дальше не распространяется. Сопротивление разрушению стеклокерамики с волокнами  $SiC$  возрастает до  $18\text{-}20 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , существенно приближаясь к соответствующим значениям для металлов.

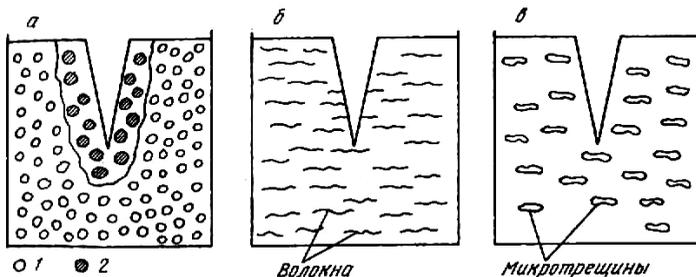


Рис.13. Схема упрочнения конструкционной керамики включениями  $ZrO_2$  (а), волокнами (б) и мелкими трещинами (в): 1 – тетрагональный  $ZrO_2$ ; 2 – моноклинный  $ZrO_2$

Третий способ состоит в том, что с помощью специальных технологий весь керамический материал пронизывают микротрещинами (см.рис.13,в). При встрече основной трещины с микротрещиной угол в острие трещины возрастает, происходит затупление трещины и она дальше не распространяется.

Определенный интерес представляет физико-химический способ повышения надежности керамики. Он реализован для одного из наиболее перспективных керамических материалов на основе нитрида кремния  $Si_3N_4$ . Способ основан на образовании определенного стехиометрического состава твердых растворов оксидов металлов в нитриде кремния, получивших название сиалонов. Примером высокопрочной керамики, образующейся в этой системе, являются сиалоны состава  $Si_{3-x}Al_xN_{4-x}O_x$ , где  $x$  – число замещенных атомов кремния, азота в нитриде кремния, составляющее от 0 до 2,1. Важным свойством сиалоновой керамики является стойкость к окислению при высоких температурах,



значительно более высокая, чем у нитрида кремния.

## 8.2. Свойства и применение керамических материалов

Принципиальными недостатками керамики являются ее хрупкость и сложность обработки. Керамические материалы плохо работают в условиях механических или термических ударов, а также при циклических условиях нагружения. Им свойственна высокая чувствительность к надрезам. В то же время керамические материалы обладают высокой жаропрочностью, превосходной коррозионной стойкостью и малой теплопроводностью, что позволяет с успехом использовать их в качестве элементов тепловой защиты. При температурах выше 1000°C керамика прочнее любых сплавов, в том числе и суперсплавов, а сопротивление ползучести и жаропрочность ее выше.

К основным областям применения керамических материалов относятся режущий инструмент, детали двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей и др.

**Режущий керамический инструмент.** Режущая керамика характеризуется высокой твердостью, в том числе при нагреве, износостойкостью, химической инертностью к большинству металлов в процессе резания. По комплексу этих свойств керамика существенно превосходит традиционные режущие материалы – быстрорежущие стали и твердые сплавы. Высокие свойства режущей керамики позволили существенно повысить скорости механической обработки стали и чугуна.

Для изготовления режущего инструмента широко применяется керамика на основе оксида алюминия с добавками диоксида циркония, карбидов и нитридов титана, а также на основе бескислородных соединений – нитрида бора с кубической решеткой ( $\beta$ -BN), обычно называемого кубическим нитридом бора, и нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Режущие элементы на основе кубического нитрида бора в зависимости от технологии получения, выпускаемые под названиями эльбор, боразон, композит 09 и др., имеют твердость, близкую к твердости алмазного инструмента, и сохраняют устойчивость к нагреву на воздухе до 1300-1400°C. В отличие от алмазного инструмента кубический нитрид бора химически инертен по отношению к сплавам на основе железа. Его можно использовать для черного и чистового точения закаленных сталей и чугунов практически любой твердости.

Режущие керамические пластины используются для осна-



жения различных фрез, токарных резцов, расточных головок, специального инструмента.

**Керамические двигатели.** Из второго закона термодинамики следует, что для повышения КПД любого термодинамического процесса необходимо повышать температуру на входе в энергетическое преобразовательное устройство: чем выше температура, тем больше КПД. Однако максимально допустимые температуры определяются теплостойкостью материала. Конструкционная керамика допускает применение более высоких температур по сравнению с металлом и поэтому является перспективным материалом для двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей. Помимо более высокого КПД двигателей за счет повышения рабочей температуры преимуществом керамики является низкая плотность и теплопроводность, повышенная термо- и износостойкость. Кроме того, при ее использовании снижаются или отпадают расходы на систему охлаждения.

Наиболее эффективно применение керамики для изготовления дизельных адиабатных поршневых двигателей, имеющих керамическую изоляцию, и высокотемпературных газотурбинных двигателей. Конструкционные материалы адиабатных двигателей должны быть устойчивы в области рабочих температур 1300-1500 К, иметь прочность при изгибе  $\sigma_{изг.}$  не менее 800 МПа и коэффициент интенсивности напряжений не менее  $8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ . Этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяют керамики на основе диоксида циркония и нитрида кремния.

**Керамика специального назначения.** К керамике специального назначения относятся сверхпроводящая керамика, керамика для изготовления контейнеров с радиоактивными отходами, броневой защиты военной техники и тепловой защиты головных частей ракет и космических кораблей.

**Контейнеры для хранения радиоактивных отходов.** Одним из сдерживающих факторов развития ядерной энергетики является сложность захоронения радиоактивных отходов. Для изготовления контейнеров применяют керамику на основе оксида бора  $\text{B}_2\text{O}_3$  и карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  в смеси с оксидом свинца  $\text{PbO}$  или соединениями типа  $2\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$ . После спекания такие смеси образуют плотную керамику с малой пористостью. Она характеризуется сильной поглощающей способностью по отношению к ядерным частицам - нейтронам и  $\gamma$ -квантам.

**Ударопрочная броневая керамика.** Впервые броневая керамика была использована в авиации армии США во время войны во Вьетнаме. С тех пор непрерывно растет применение армиями



## Физическое и прикладное материаловедение

разных стран брони из керамики в комбинации с другими материалами для защиты сухопутных боевых машин, кораблей, самолетов и вертолетов. По разным оценкам рост применения броневой керамической защиты составляет около 5-7% в год. Одновременно наблюдается рост производства композиционной брони для индивидуальной защиты сил охраны правопорядка, обусловленный ростом преступности и актов терроризма.

По своей природе керамические материалы являются хрупкими. Однако при высокой скорости нагружения, например в случае взрывного удара, когда эта скорость превышает скорость движения дислокаций в металле, пластические свойства металлов не будут играть никакой роли и металл будет таким же хрупким, как и керамика. В этом конкретном случае керамика существенно прочнее металла.

Важными свойствами керамических материалов, обусловивших их применение в качестве брони, являются высокие твердость, модуль упругости, температура плавления (разложения) при в 2-3 раза меньшей плотности. Сохранение прочности при нагреве позволяет использовать керамику для бронепрожигающих снарядов.

Наиболее высокие защитные свойства имеют материалы на основе карбида бора. Их массовое применение сдерживается высокой стоимостью метода прессования. Поэтому плитки из карбида бора используют при необходимости существенного снижения массы броневой защиты, например для защиты кресел и автоматических систем управления вертолетов, экипажа и десанта. Керамику из диборида титана, имеющую наибольшую твердость и модуль упругости, применяют для защиты от тяжелых броневой и бронепрожигающих танковых снарядов.

Для массового производства керамики наиболее перспективен сравнительно дешевый оксид алюминия. Керамику на его основе используют для защиты живой силы, сухопутной и морской военной техники. Пластина из карбида бора толщиной 6,5 мм или из оксида алюминия толщиной 8 мм останавливает пулю калибром 7,62 мм, летящую со скоростью более 800 м/с при выстреле в упор. Для достижения того же эффекта стальная броня должна иметь толщину 10 мм, при этом масса ее будет в 4 раза больше, чем у керамической.

Наиболее эффективно применение композиционной брони, состоящей из нескольких разнородных слоев. Наружный керамический слой воспринимает основную ударную и тепловую нагрузку, дробится на мелкие частицы и рассеивает кинетическую



энергию снаряда. Остаточная кинетическая энергия снаряда поглощается другой деформацией подложки, в качестве которой может использоваться сталь, дуралюмин или кевларовая ткань в несколько слоев. Эффективно покрытие керамики легкоплавким инертным материалом, играющим роль своеобразной смазки и несколько изменяющим направление летящего снаряда, что обеспечивает рикошет.

Конструкция керамической брони показана на рис.14. Бронепанель состоит из отдельных последовательно соединенных керамических пластин размером 50x50 или 100x100 мм. Для защиты от бронебойных пуль калибром 12,6 мм используют пластины из  $Al_2O_3$  толщиной 15 мм и 35 слоев кевлара, а от пуль калибром 7,62 мм, находящихся на вооружении НАТО, – пластины из  $Al_2O_3$  толщиной 6 мм и 12 слоев кевлара.

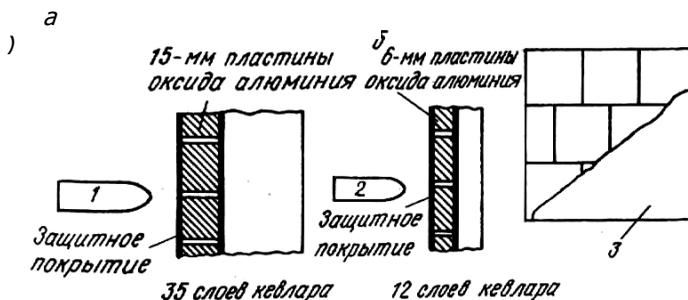


Рис.14. Конструкция керамической бронепанели:  
 а, б – составные элементы бронепанели для защиты от бронебойных пуль разного калибра; в – фрагмент бронепанели, собранной из элементов а и б;  
 1 – бронебойная пуля калибра 12,7 мм; 2 – пуля калибра 7,62 мм;  
 3 – защитное покрытие частично снято

Для броневой защиты также перспективно применение материалов на основе  $AlN$ ,  $TiB_2$  и полиамидных смол, армированных керамическими волокнами.

*Керамика в ракетно-космическом машиностроении.* При прохождении в плотных слоях атмосферы головные части ракет, космических кораблей, кораблей многоразового использования, нагреваемые до высокой температуры, нуждаются в надежной теплозащите.

Материалы для тепловой защиты должны обладать высокой теплостойкостью и прочностью в сочетании с минимальными



значениями коэффициента термического расширения, теплопроводности и плотности.

Для повышения прочности, отражательной способности и абляционных характеристик внешней поверхности теплозащитных материалов их покрывают слоем эмали толщиной около 300 мкм. Эмаль, содержащую SiC или 94% SiO<sub>2</sub> и 6% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в виде шликера наносят на поверхность, а затем подвергают спеканию при 1470К. Плиты с покрытиями используют в наиболее нагреваемых местах космических кораблей, баллистических ракет и гиперзвуковых самолетов. Они выдерживают до 500 десятиминутных нагревов в электродуговой плазме при температуре 1670К.

### **8.3. Общая характеристика и классификация композиционных материалов**

Традиционно применяемые металлические и неметаллические материалы в значительной мере достигли своего предела конструктивной прочности. Вместе с тем развитие современной техники требует создания материалов, надежно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, при воздействии агрессивных сред, излучений, глубокого вакуума и высоких давлений. Зачастую требования, предъявляемые к материалам, могут носить противоречивый характер. Удовлетворить эти требования можно путем использования композиционных материалов.

Композиционным материалом (КМ), или композитом, называют объемную гетерогенную систему, состоящую из сильно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых компонентов, строение которой позволяет использовать преимущества каждого из них.

Принцип построения КМ человек заимствовал у природы. Типичными композиционными материалами являются стволы деревьев, стебли растений, кости человека и животных. Композиты позволяют иметь заданное сочетание разнородных свойств: высокой удельной прочности и жесткости, жаропрочности, износостойкости, теплозащитных свойств и др. Спектр свойств КМ невозможно получить при использовании обычных материалов. Их применение дает возможность создавать ранее недоступные принципиально новые конструкции.

Благодаря КМ стал возможен новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей, уменьшении массы машин и



## Физическое и прикладное материаловедение

конструкций и повышении весовой эффективности транспортных средств и авиационно-космических аппаратов. Важными характеристиками материалов, работающих в этих условиях, являются удельная прочность и удельная жесткость. По удельной прочности и жесткости композиционные материалы превосходят все известные конструкционные сплавы.

Композиционные материалы состоят из сравнительно пластичного матричного материала-основы и более твердых и прочных компонентов, являющихся наполнителями. Свойства КМ зависят от свойств основы, наполнителей и прочности связи между ними.

Матрица связывает композицию в монолит, придает ей форму и служит для передачи внешних нагрузок арматуре из наполнителей. В зависимости от материала основы различают КМ с металлической матрицей, или металлические композиционные материалы (МКМ), с полимерной - полимерные композиционные материалы (ПКМ) и с керамической - керамические композиционные материалы (ККМ).

Ведущую роль в упрочнении КМ играют наполнители, часто называемые упрочнителями. Они имеют высокую прочность, твердость и модуль упругости. По типу упрочняющих наполнителей КМ подразделяют на дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые (рис.15).

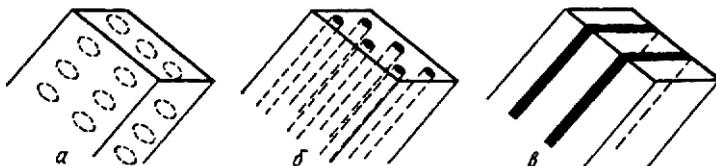


Рис.15. Схема строения композиционных материалов:  
а – дисперсно-упрочненные; б – волокнистые; в – слоистые

В дисперсно-упрочненные КМ искусственно вводят мелкие равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и др., не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояние между ними, тем прочнее КМ. В отличие от волокнистых, в дисперсно-упрочненных КМ основным несущим элементом является матрица. Ансамбль дисперсных частиц наполнителя упрочняет материал за счет сопротивления движению дислокаций при нагружении, что затрудняет пластическую деформацию. Эффективное со-



## Физическое и прикладное материаловедение

противление движению дислокаций создается вплоть до температуры плавления матрицы благодаря чему дисперсно-упрочненные КМ отличаются высокой жаропрочностью и сопротивлением ползучести.

Арматурой в волокнистых КМ могут быть волокна различной формы: нити, ленты, сетки разного плетения. Армирование волокнистых КМ может осуществляться по одноосной, двухосной и трехосной схеме (рис.16,а). Прочность и жесткость таких материалов определяется свойствами армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку. Армирование дает больший прирост прочности, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо.

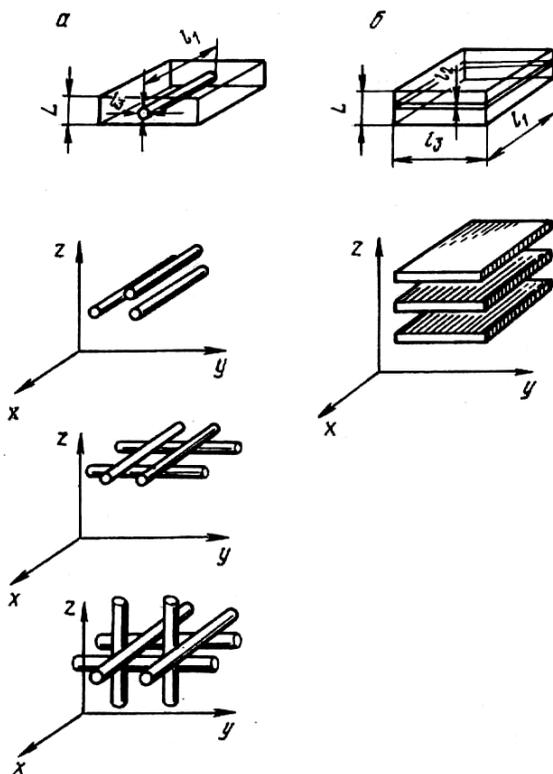


Рис.16. Схема армирования волокнистых (а) и слоистых (б) композиционных материалов

Слоистые композиционные материалы (см.рис.16,б) наби-



раются из чередующихся слоев наполнителя и матричного материала (типа "сэндвич"). Слои наполнителя в таких КМ могут иметь различную ориентацию. Возможно поочередное использование слоев наполнителя из разных материалов с разными механическими свойствами. Для слоистых композиций обычно используют неметаллические материалы.

### 8.3.1. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы

При дисперсном упрочнении частицы блокируют процессы скольжения в матрице. Эффективность упрочнения при условии минимального взаимодействия с матрицей зависит от вида частиц, их объемной концентрации, а также от равномерности распределения в матрице. Применяют дисперсные частицы тугоплавких фаз типа  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $BN$ ,  $SiC$ , имеющие малую плотность и высокий модуль упругости. Композиционные материалы обычно получают методом порошковой металлургии, важным преимуществом которого является изотропность свойств в различных направлениях.

В промышленности обычно применяют дисперсно-упрочненные КМ на алюминиевой и реже – никелевой основах. Характерными представителями этого вида композиционных материалов являются материалы типа САП (спеченная алюминиевая пудра), которые состоят из алюминиевой матрицы, упрочненной дисперсными частицами оксида алюминия. Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера около 1 мкм в присутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче, и в ней повышается содержание оксида алюминия. Дальнейшая технология производства изделий и полуфабрикатов из САП включает холодное прессование, предварительное спекание, горячее прессование, прокатку или выдавливание спеченной алюминиевой заготовки в форме готовых изделий, которые можно подвергать дополнительной термической обработке.

Сплавы типа САП удовлетворительно деформируются в горячем состоянии, а сплавы с 6-9%  $Al_2O_3$  – и при комнатной температуре. Из них холодным волочением можно получить фольгу толщиной до 0,03 мм. Эти материалы хорошо обрабатываются резанием и обладают высокой коррозионной стойкостью. Марки САП, применяемые в России, содержат 6-23%  $Al_2O_3$ . Различают САП-1 с содержанием 6-9, САП-2 с 9-13, САП-3 с 13-18%  $Al_2O_3$ . С увеличением объемной концентрации оксида



алюминия возрастает прочность композиционных материалов.

Материалы типа САП обладают высокой жаропрочностью и превосходят все деформируемые алюминиевые сплавы. Далее при температуре 500°C они имеют  $\sigma_B$  не менее 60-110 МПа. Жаропрочность объясняется тормозящим действием дисперсных частиц на процесс рекристаллизации. Характеристики прочности сплавов типа САП весьма стабильны. Испытания длительной прочности сплавов типа САП-3 в течение 2 лет практически не повлияли на уровень свойств как при комнатной температуре, так и при нагреве до 500°C. При 400°C прочность САП в 5 раз выше прочности стареющих алюминиевых сплавов.

Сплавы типа САП применяют в авиационной технике для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, работающих при температурах до 300-500°C. Из них изготавливают штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки тепловыделяющих элементов и трубы теплообменников.

### 8.3.2. Волокнистые композиционные материалы

Помимо обеспечения прочности и монолитности конструкции матрица должна иметь необходимую пластичность и быть работоспособной в той температурной области, для которой предназначен КМ.

Для изготовления КМ, применяемых при температурах ниже 200°C, используют полимерные матрицы. К таким композициям относятся стеклопластики, армированные короткими стеклянными волокнами в матрице из полиэфирной смолы. Стеклопластики применяют для изготовления корпусов автомобилей, лодок, некоторых бытовых приборов. В качестве матриц также используют термореактивные полимеры, в которых поперечные связи между основными цепями формируют жесткую структуру с трехмерной сеткой. Такими полимерами являются эпоксидные смолы, которые благодаря поперечным связям имеют более высокую термостойкость. На рис.17 схематически показан способ изготовления такого композита. Волокна сматывают с бобин, подвергают поверхностной обработке, улучшающей адгезию, протягивают в ванну, где их покрывают полимерной смолой. Смола скрепляет волокна в плоский жгут – ленту. Готовые ленты собирают в слоистый листовый материал (аналог фанеры) или же наматывают в более сложные формы. Собранный в листы или намотанный материал отверждают термообработкой. Слои можно накладывать поочередно с разным направлением волокон и формировать в



композите клетчатую структуру арматуры. Это придает материалу жесткость. Недостатком такого композита является отсутствие поперечного армирования в каждом отдельном слое и между слоями, поэтому материал может расслаиваться. К тому же появившаяся трещина в объемном образце из такого КМ легко находит путь распространения между слоями. Для устранения этих недостатков изготавливают тканые КМ.

Для работы при более высоких температурах применяют металлические матрицы. Обычно используют металлы с малой плотностью: алюминий, реже – магний, титан. Металлические КМ обладают рядом преимуществ перед полимерными. Помимо более высокой рабочей температуры, они характеризуются лучшей изотропией и большей стабильностью свойств в процессе эксплуатации, более высокой эрозионной стойкостью. Пластичность металлических матриц сообщает конструкции необходимую вязкость. Это способствует быстрому выравниванию локальных механических нагрузок.

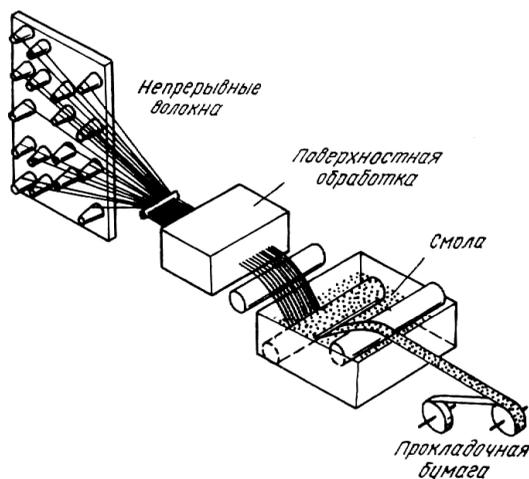


Рис.17. Схема изготовления композиционного материала

Высокая теплопроводность металлических КМ предохраняет от локальных перегревов, что особенно важно для таких изделий, как наконечники ракет и ведущие кромки крыльев. Высокая электропроводность металлических КМ хорошо защищает их от электромагнитного излучения, молнии, снижает опасность статического электричества.

Важным преимуществом металлических КМ является



## Физическое и прикладное материаловедение

ся более высокая технологичность процесса изготовления, формовки, термообработки, формирования соединений и покрытий.

Для наиболее высоких рабочих температур в качестве матричного материала применяют керамику. Ее основной недостаток – отсутствие пластичности – в некоторой степени компенсируется армирующими волокнами, тормозящими распространение трещин в керамике.

Использование в качестве матричного материала аморфного углерода, а в качестве армирующего материала – волокон из кристаллического углерода (графита) позволило создать композит, выдерживающий нагрев до 2500°C. Такой углерод-углеродный композит перспективен для космонавтики и заатмосферной авиации. Толчком к интенсивному использованию углерод-углеродных композитов в США послужили работы по программе создания космических кораблей многоразового использования. Недостаток углеродной матрицы состоит в возможном окислении и абляции. Для предотвращения этих явлений композит покрывают тонким слоем карбида кремния.

Таким образом, наиболее важным критерием выбора матричного материала является рабочая температура эксплуатации композита. Помимо высокой прочности и жесткости, основными требованиями, предъявляемыми к волокнам для КМ, является хорошее смачивание материала волокна расплавленной матрицей в процессе изготовления композита. Важными условиями являются слабое взаимодействие волокна с материалом матрицы и его высокая окислительная стойкость.

Для армирования металлических КМ обычно используют непрерывные волокна: углеродные (УВ), борные (В), оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), карбида кремния (SiC), карбида бора ( $B_4C$ ), нитрида бора (BN), диборида титана ( $TiB_2$ ), оксида кремния ( $SiO_2$ ). Также в качестве волокон применяют металлическую тонкую проволоку, полученную методом волочения из стали, вольфрама, титана, молибдена и бериллия. Реже используют нитевидные специально выращенные кристаллы разных материалов.

Наибольшее распространение для армирования металлических КМ получили непрерывные или дискретные углеродные и борные волокна. Волокна бора обычно получают осаждением бора из газовой фазы при диссоциации его галоидных соединений, например треххлористого бора  $BCl_3$ . Бор осаждается на основу из тонкой (12 мкм) вольфрамовой нити, нагретой до 1100-1200°C. В процессе осаждения бор диффундирует в вольфрамовую основу, образуя бориды вольфрама в сердцевине волокна. Время пребы-



вания волокна в реакционной камере составляет 1-2 мин.  
Общий диаметр борного волокна составляет 100-150 мкм.

Композиты получают разными методами: пропитка пучка волокон жидкими расплавами алюминия и магния, плазменное напыление, применение методов горячего прессования иногда с последующей гидроэкструзией или прокаткой заготовок. При армировании непрерывными волокнами композиций типа "сэндвич", состоящих из чередующихся слоев алюминиевой фольги и волокон, применяют прокатку, горячее прессование, сварку взрывом, диффузионную сварку. Отливку прутков и труб, армированных высокопрочными волокнами, получают из жидкометаллической фазы. Пучок волокон непрерывно проходит через ванну с расплавом и пропитывается под давлением жидким алюминием, магнием или жидкой смолой в случае изготовления полимерного материала. При выходе из пропиточной ванны волокна соединяются и пропускаются через фильеру, формирующую пруток или трубу. Этот метод обеспечивает максимальное наполнение композита волокнами (до 85%), их однородное распределение в поперечном сечении и непрерывность процесса.

Для многих видов волокон разработаны технологические процессы нанесения покрытий для обеспечения лучшей смачиваемости, окислительной стойкости и оптимального взаимодействия волокна с матрицей. Борные волокна защищают от реагирования с расплавами титана и алюминия созданием на поверхности диффузионного барьера из карбидов кремния или бора. Волокна бора, защищенные карбидом кремния, называют borsic (борсик). Из-за высокой окислительной способности углеродных волокон на их поверхность наносят специальные покрытия, а процессы переработки осуществляют в защитной атмосфере.

Волокна карбида кремния получают методом химического осаждения из паровой фазы на подложку из борного или углеродного волокна. Эти волокна имеют хорошую теплостойкость, стойкость к окислению и мало реагируют с металлом.

### 8.3.3. Слоистые композиты

Материалом основы композитов со слоистым строением являются пластмасса, металл или керамика. В качестве наполнителей применяются полимерные волокна, ленты из тканей, трикотажа и других материалов. Хорошо известные ламинаты изготовлены из смол, армированных полимерными волокнами или стеклотканью. Они широко применяются в строительстве, машино-



## Физическое и прикладное материаловедение

строении, мебельной промышленности, спортивном снаряжении, домашнем хозяйстве и т.д.

К этой же группе композитов относятся абляционные материалы для тепловой защиты ракет, изготовленные на базе фенолформальдегидных смол с углеродным или стекловолокном. В этих материалах часто используется стеклоткань, которая при многослойном нанесении обеспечивает высокие механические свойства изделий, например тонкостенных труб, втулок и др.

Встречаются композиты, в которых слоистым связующим являются алюминиевые, титановые, медные, никелевые и кобальтовые листы и фольги, а слоями, определяющими специальные свойства и применение, – керамика, интерметаллидные соединения или другие металлы.

Слоистые керамические композиты используют в экстремальных условиях. Компонентами этого типа композиционных материалов чаще всего являются керамика, углерод и металлы, например корунд, пиролитический графит, карбиды, оксиды, нитриды в композиции с алюминием, медью, титаном, никелем, кобальтом, танталом, железом. Такие материалы нашли применение в космических аппаратах для изготовления теплоизоляционных силикатных плиток из корунда, боросиликата, углеродных карбондовых ламинатов.

### Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию сталей по структуре в равновесном состоянии, основным свойствам и назначению. Какова маркировка сталей в России и зарубежных стандартах?
2. Приведите примеры маркировки конструкционных углеродистых сталей обыкновенного качества и качественных углеродистых сталей. Каков их химический состав? В чем особенности их термической обработки, структуры, свойств, каковы области их применения?
3. Укажите химический состав конструкционных легированных сталей нормальной, повышенной и высокой прочности. Назовите особенности их маркировки, термической обработки, структуры, свойств, области их применения.
4. Назовите особенности химического состава и маркировки автоматных сталей. Какова их термическая обработка, структура, свойства, области применения?
5. Каковы особенности маркировки, термической обработки, структуры, свойств, областей применения для сталей с высо-



## Физическое и прикладное материаловедение

кой технологической прочностью?

6. Укажите химический состав, маркировку, термическую обработку, структуру, свойства, области применения свариваемых и строительных сталей.

7. Каков химический состав, маркировка, термическая обработка, структура, свойства, области применения литейных сталей?

8. В чем особенности химического состава, маркировки, термической обработки, структуры, свойств, областей применения сталей с высокой износостойкостью?

9. Приведите примеры маркировки, термической обработки, структуры, свойств, области применения шарикоподшипниковых сталей. Каков их химический состав?

10. Укажите химический состав, маркировку, термическую обработку, структуру, свойства, области применения сталей и сплавов с высокими упругими свойствами.

11. Каковы особенности химического состава, маркировки, термической обработки, структуры, свойств, областей применения жаростойких и жаропрочных сталей?

12. Приведите химический состав, маркировку, термическую обработку, структуру, свойства, области применения хладостойких сталей для криогенной техники.

13. Укажите химический состав, маркировку, термическую обработку, структуру, свойства, области применения коррозионностойких сталей.

14. Назовите особенности химического состава, маркировки, структуры, областей применения сталей и сплавов с особыми магнитными свойствами.

15. Как маркируются окалиностойкие стали и сплавы с высоким омическим сопротивлением? Каков их химический состав, как они маркируются, какую имеют структуру?

16. Приведите примеры маркировки сталей и сплавов для режущего инструмента. Каков их химический состав, термическая обработка, структура, свойства, области применения?

17. Назовите особенности маркировки, термической обработки, структуры, свойств, областей применения сталей для измерительного инструмента.

18. В чем заключаются особенности химического состава, маркировки, термической обработки, структуры, свойств, областей применения штамповых сталей для холодного и горячего деформирования.

19. Укажите химический состав, структуру, свойства, об-



## Физическое и прикладное материаловедение

ласти применения серых, высокопрочных и ковких чугунов.

20. Назовите химический состав, маркировку, термическую обработку, структуру, свойства, области применения металлов и сплавов с особыми тепловыми свойствами.

21. Приведите примеры маркировки, термической обработки, структуры, свойств, областей применения тугоплавких металлов и сплавов на их основе. Укажите их химический состав.

22. В чем особенности химического состава, маркировки, термической обработки, структуры, свойств деформируемых алюминиевых сплавов, упрочняемых термической обработкой?

23. Приведите примеры маркировки, термической обработки, структуры, свойств, областей применения высокопрочных и жаропрочных алюминиевых сплавов, сплавов дляковки и штамповки.

24. Укажите химический состав, структуру, свойства, область применения деформируемых алюминиевых сплавов, не упрочняемых термической обработкой.

25. Приведите примеры химического состава, структуры, свойств, областей применения литейных алюминиевых сплавов.

26. В чем особенности маркировки, структуры, свойств, областей применения магния и его сплавов?

27. Укажите химический состав, структуру, свойства, область применения меди и ее сплав с цинком, оловом, алюминием, кремнием, бериллием, свинцом, никелем.

28. Изобразите молекулярную структуру полимеров и сополимеров, назовите их термомеханические свойства, области применения.

29. Назовите наполнители, пластификаторы, отвердители, катализаторы, красители, входящие в состав термопластичных пластмасс. Укажите области их применения.

30. Укажите химический состав, свойства, области применения полярных термопластов, термоактивных и газонакопительных пластмасс, пластмасс с порошковыми наполнителями.

31. Назовите состав, свойства, область применения изделий из резины. Какова технология приготовления резиновых смесей и формообразования деталей из резины?

32. В чем особенности химического состава, свойств, областей применения композиционных материалов с алюминиевой и никелевой основой?

33. Приведите примеры эвтектических композиционных материалов и композиционных материалов на неметаллической основе. Укажите их свойства и области применения.



## Физическое и прикладное материаловедение

34. Назовите достоинства и недостатки клеевых соединений. Приведите классификацию клеящих материалов. Назовите их свойства и области применения.

35. Назовите состав, разновидности, свойства и области применения неорганического технического стекла.

36. Назовите разновидности, свойства и области применения керамики.

### Рекомендуемая литература

1. Машиностроительные материалы: Краткий справочник / В.М. Раскатов, В.С. Чуенков, Н.Ф. Бессонова и др.. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.

2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.М. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

3. Стерин И.С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки. – СПб: Политехника, 2003. – 344 с.

4. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение. – СПб: Химиздат, 2004. – 736 с.



## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ ПО КУРСУ «МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ»

### Лабораторная работа №1 МИКРОСТРУКТУРА ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** сопоставление микроструктуры легированных сталей.

#### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Легированной называется сталь, содержащая специально введенные элементы для получения требуемых свойств или имеющая повышенное содержание постоянных, технологически неизбежных примесей.

Наиболее распространенными легирующими элементами являются хром, марганец, никель, кремний, вольфрам, ванадий, молибден, титан и другие. Поскольку при выплавке в сталь обычно вводятся кремний и марганец для раскисления и связывания серы, то легированной является сталь при их содержании соответственно  $>0,9$  и  $0,8\%$ ,

Легирующие элементы, растворяясь в железе, изменяют положение критических точек, расширяя или сужая область феррита и аустенита, поэтому пользоваться диаграммой состояния железо-цементит при анализе структур легированных сталей в ряде случаев совершенно недопустимо.

По отношению к углероду легирующие элементы делятся на две группы - некарбидообразующие: никель, кремний, алюминий, медь, кобальт; - карбидообразующие: титан, ванадий, вольфрам, молибден, хром, марганец и другие (элементы перечислены в порядке уменьшения устойчивости их карбидов к растворению в аустените при нагреве).

Некарбидообразующие элементы растворяются в феррите и аустените, тогда как карбидообразующие взаимодействуют с углеродом, и в зависимости от их количества и концентрации способны растворяться в феррите, аустените, цементите или образовывать специальные карбиды.

Легирующие элементы обозначаются следующими буквами: С - кремний, Г - марганец, Х - хром, Н - никель, М - молибден, В - вольфрам, Ф - ванадий, Т - титан, Ю - алюминий, К - кобальт,



## Физическое и прикладное материаловедение

Д - медь, Р - бор, Ц - цирконий, Б - ниобий, П - фосфор, А - азот, Ч - редкоземельные металлы.

Каждая марка стали составляется из сочетания букв и цифр. Первые две цифры обозначают содержание углерода в сотых долях процента, а количество легирующих элементов указывается в процентах цифрами, стоящими после соответствующей буквы. Если легирующего элемента около 1% или менее, то цифра после буквы не ставится. Например, сталь 18ХГТ содержит 0,17-0,23%С; 1,00-1,30%Cr; 0,80-1,10%Mn; 0,06-0,12%Ti.

В сталях инструментальных и с особыми свойствами такая маркировка содержания углерода часто не выдерживается. Так в инструментальных сталях количество углерода обычно обозначается только одной цифрой в десятых долях процента, например, 5ХНМ, 7ХЗ, 6ХС и другие. Кроме того, в инструментальных сталях, имеющих углерода 1% и более, цифры, обозначающие его содержание, полностью опускают. Например, сталь Х12М содержит 1,45-1,70%С; 11,0-12,5%Cr; 0,40-0,60%Mo.

Буква А, стоящая в конце марки, указывает, что сталь высококачественная и имеет пониженное содержание серы и фосфора. Например, сталь для азотирования 35ХМЮА содержит серы и фосфора менее 0,025%, тогда как в цементуемой качественной стали 18ХГТ серы и фосфора менее 0,035%.

Некоторые марки сталей выделены в особые группы и обозначаются буквами, стоящими в начале марки: быстрорежущие - Р, шарикоподшипниковые - Ш, для постоянных магнитов - Е, электротехнические - Э и другие. Например, Р18, Р9Ф5, ШХ15, ЕХЗ, Э42 и т.д.

Легированные стали могут быть классифицированы по следующим признакам: составу, назначению, микроструктуре в равновесном состоянии и после охлаждения на воздухе.

### 1.1. Классификация легированной стали по составу

В зависимости от основных легирующих элементов легированные стали по составу классифицируются как хромистые, марганцовистые, кремнистые, хромоникелевые, хромоникельмолибденовые и другие.

### 1.2. Классификация легированной стали по назначению

По назначению легированные стали разделяются на три основные группы: конструкционные, инструментальные, стали и сплавы с особыми свойствами.

1. Конструкционные стали применяются для изготовления деталей машин. Они подразделяются на цементуемые и улучшаемые. Легирующие элементы в конструкционные стали вводятся, в



основном, для повышения прокаливаемости.

Цементуемые легированные стали имеют низкое содержание углерода (0,10-0,25%) для того, чтобы после цементации, закалки и низкого отпуска детали имели твердый поверхностный слой и вязкую сердцевину. Твердость поверхностного слоя после такой обработки около 60HRC, а сердцевины - находится в пределах 15-30HRC. К цементуемым относятся стали 15X; 20X; 18ХГТ; 12ХН3А; 20Х2Н4А и другие.

Улучшаемые легированные стали содержат 0,30-0,45% углерода и обычно подвергаются термической обработке - улучшению, которая заключается в закалке с последующим высоким отпуском. В качестве легирующих элементов наиболее часто применяются хром, марганец, никель, вольфрам, молибден и кремний. Улучшаемыми являются стали 40X, 30ХГТ, 30ХГСА, 40ХН, 40ХМ и другие.

2. Инструментальные легированные стали имеют повышенное содержание углерода, который обеспечивает получение высокой твердости путем термической обработки. Легирующие элементы в инструментальные стали вводятся для увеличения прокаливаемости, красностойкости, жаропрочности, а в ряде случаев для повышения износостойкости за счет образования карбидов.

В зависимости от назначения и химического состава инструментальные легированные стали делятся на три группы: стали для режущего и измерительного инструмента (пониженной прокаливаемости марок 7ХФ, 8ХФ, 9ХФВ1 и другие, обычно закаливаемые в воде, и повышенной прокаливаемости марок X, ХГ, ХВГ, ХВСГ, 9ХВГ, 9ХС, 9Х5ВФ и другие, закаливаемые в масле); быстрорежущие стали, широко применяемые для изготовления режущего инструмента; (нормальной производительности марок Р9, Р12, Р18, Р6М5, Р18Ф2 и повышенной производительности марок Р9Ф5, Р9К5, Р9К10, Р10К5Ф5, Р14Ф4, Р18К5Ф2, содержащие повышенное количество кобальта и ванадия); стали для штампового инструмента (для деформирования в холодном состоянии марок 9Х, X, Х6ВФ, Х12, Х12М, Х12Ф1; для деформирования с большими ударными нагрузками марок 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С, 5ХВ2С, 6ХВ2С, 6ХВГ и для деформирования в горячем состоянии марок 7Х3, 8Х3, 3Х2В8Ф, 4Х8В2, 4Х2В5ФМ, 4Х5В2С, 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНГ, 5ХГМ, 5ХНСВ и другие).

3. Стали и сплавы с особыми свойствами. К ним относятся стали: нержавеющие 12Х13, 20Х13, 08Х18Н10Т; жаропрочные 45Х14Н14В2М, 40Х9С2; износостойкие; с особыми магнитными и



электрическими свойствами и другие. Условно принято, что если сумма легирующих элементов превышает 55%, то такой сплав сталью не называют.

1.3. Классификация легированной стали по равновесной структуре

Определение класса стали производится по структуре, которую она имеет после медленного охлаждения из аустенитного состояния, то есть в результате полного отжига. По этой классификации, предложенной П.Обергоффером, легированные стали делятся на шесть классов: доэвтектоидный, эвтектоидный, заэвтектоидный, ледебуритный, аустенитный и ферритный.

Рассматриваемая классификация аналогична классификации углеродистых сталей, однако большинство легирующих элементов сильно искажают диаграмму железо-цементит, сдвигая точки S и E в сторону меньшего содержания углерода. Это объясняется уменьшением предельной растворимости углерода в аустените при введении легирующих элементов, поэтому граница между доэвтектоидными, заэвтектоидными и ледебуритными сталями может лежать при значительно меньшем содержании углерода, чем в углеродистых сталях.

1.4. Классификация легированной стали по структуре после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния

Для определения принадлежности к тому или иному классу в соответствии с этой классификацией сталь (в виде образцов толщиной 15-20 мм) нагревают до аустенитного состояния, а затем охлаждают на воздухе, то есть подвергают нормализации.

Эта классификация, предложенная французским ученым Л.Гийе, основывается на уменьшении критической скорости заковки и снижении температурного интервала мартенситного превращения при увеличении содержания легирующих элементов в стали. При одинаковой скорости охлаждения (на воздухе) из аустенитного состояния стали с различным содержанием легирующих элементов могут приобретать перлитную, мартенситную или аустенитную структуру. В связи с этим, по структуре после охлаждения на воздухе различают следующие три основных класса сталей: перлитный, мартенситный и аустенитный.

Кроме трех указанных основных классов, характеризующихся по структуре, получаемой сталью при охлаждении на воздухе, существуют карбидный и ферритный классы. Для сталей карбидного класса условным признаком является уже не основная структура образца диаметром 15-20 мм, охлажденного на воздухе из

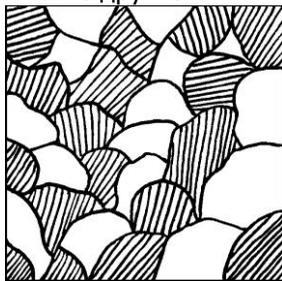


аустенитного состояния, а присутствие значительного количества карбидов, которые образуются при наличии в стали большого количества углерода и карбидообразующих легирующих элементов. Стали ферритного класса по структуре после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния совпадают со сталями ферритного класса по структуре в равновесном состоянии.

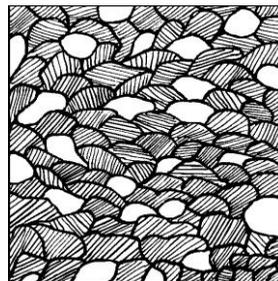
## 2. МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

2.1. Микроструктура легированных сталей в равновесном состоянии

1. Доэвтектоидные стали имеют структуру феррита и перлита (рисунок 1,а). Количество феррита и перлита в структуре определяется содержанием углерода в стали и концентрацией углерода в эвтектоиде. К этому классу относятся конструкционные стали, например, марок 15Х, 18ХГТ, 18Х2Н4ВА, 30ХГСА, 40Х и многие другие.



а)



б)

Рисунок 1.- Схемы микроструктуры легированной стали доэвтектоидного класса марки 30ХГСА после полного отжига от 880°С (а- тонкопластинчатый перлит и феррит) и после нормализации от 880°С (б- сорбит и феррит)  $\times 600$  (сорбит при увеличении светового микроскопа так, как показан на схеме, не разрешается)

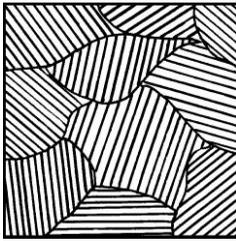
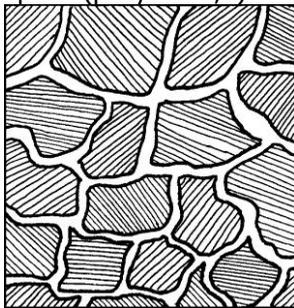


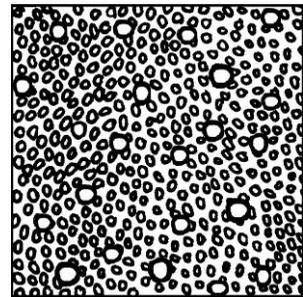
Рисунок 2.- Схема микроструктуры легированной стали эвтектоидного класса марки 70С3А после полного отжига от 860°С. Пластинчатый перлит.  $\times 600$

2. Эвтектоидные стали имеют перлитную структуру (рисунок 2). С увеличением содержания легирующих элементов концентрация углерода в перлите снижается и становится значительно меньше 0,8%. Например, сталь марки 70С3А, содержащая 0,66-0,74%С и 2,40-2,80%Si, имеет в отожженном состоянии перлитную структуру.

3. Заэвтектоидные стали имеют структуру, состоящую из перлита и избыточных вторичных карбидов. К этому классу относятся инструментальные стали марок Х, ХГ, ХВГ, ХГСВ и другие. Так сталь ХГ, содержащая 1,30-1,50%С; 1,30-1,60%Cr и 0,45-0,70%Mn, после полного отжига из однофазного аустенитного состояния имеет структуру, состоящую из тонкопластинчатого перлита и сетки избыточных вторичных карбидов (рисунок 3,а). Сплошная сетка карбидов снижает механические свойства заэвтектоидных сталей, поэтому они подвергаются отжигу на зернистый перлит (рисунок 3,б).



а)



б)

Рисунок 3.- Схема микроструктуры легированной стали заэвтектоидного класса марки ХГ после полного отжига от 1000°С (а- тонкопластинчатый перлит и сетка вторичных карбидов) и отжига на зернистый перлит (б- зернистый перлит и вторичные карбиды округлой формы).  $\times 600$

4. Ледебуритного класса стали содержат в структуре первичные карбиды, выделившиеся из жидкой фазы при кристаллизации и входящие в состав эвтектики - ледебурита. Легирующие



элементы могут настолько сильно уменьшить растворимость углерода в аустените, что при концентрации его менее 1% возможно образование ледебурита в стали. Например, в литой быстрорежущей стали марки P18, содержащей 0,70-0,80%С; 17,5-19,0%W; 1,0-1,4%V и 3,8-4,4%Cr, присутствует ледебурит, имеющий в вольфрамовых сталях "скелетообразный" вид. Ледебурит состоит из пластинок карбидов, чередующихся с аустенитом.

При охлаждении в процессе кристаллизации перитектическое превращение (жидкость+ $\delta$ -феррит $\rightarrow$ аустенит) не успевает завершиться, и в структуре сохраняется некоторое количество  $\delta$ -феррита, который в быстрорежущих сталях при дальнейшем охлаждении претерпевает эвтектоидный распад с образованием  $\delta$ -эвтектоида, состоящего из тонкодисперсной смеси аустенита и карбидов. Из-за большой измельченности  $\delta$ -эвтектоид сильно травится, имеет вид темных кристаллов округлой формы и плохо отличим в оптическом микроскопе от перлита (рисунок 4,а).

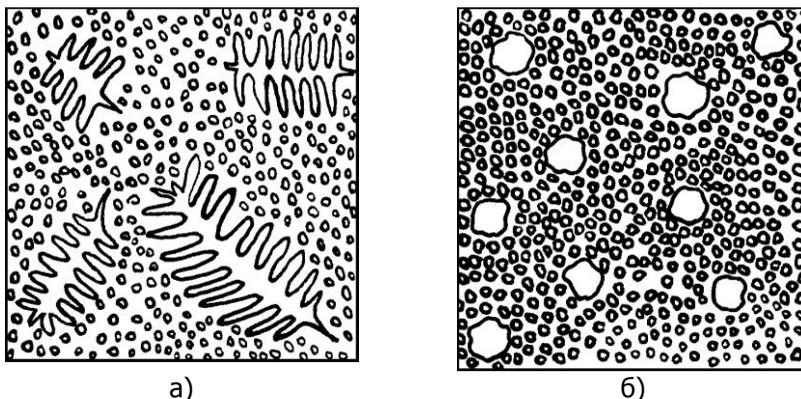


Рисунок 4.- Схема микроструктуры легированной стали ледебуритного класса марки P18 в литом состоянии (а- ледебурит, аустенит и эвтектоид) и после обработки давлением - ковки и отжига (б- крупные первичные и мелкие вторичные карбиды, мелкозернистый перлит).  $\times 600$

Карбиды, образовавшиеся в процессе кристаллизации и входящие в состав ледебурита, называются первичными.

По структуре стали ледебуритного класса следовало бы рассматривать как белые чугуны. Однако в результате пониженного содержания углерода они по свойствам значительно ближе к стали, чем к чугунам, что позволяет рассматривать их как стали. Ледебуритные стали обладают более высокой пластичностью,



чем белые чугуны, поэтому путем горячей обработки давлением удастся раздробить ледебуритную эвтектику и повысить свойства стали за счет равномерного распределения карбидов. Структура ковальной и отожженной быстрорежущей стали P18 состоит из крупных первичных карбидов, более мелких вторичных и мелкозернистого перлита, состоящего из легированного феррита и эвтектоидных карбидов (рисунок 4,б).

К ледебуритному классу относятся инструментальные стали - быстрорежущие марок P9, P12, P18, P9Ф5, P10K5Ф5 и для штампов холодной штамповки марок X12, X12Ф1, X12M.

5. Аустенитного класса стали содержат большое количество легирующих элементов, которые расширяют область аустенита, повышая его устойчивость, и резко сужают область существования феррита.

Элементами, стабилизирующими аустенитную структуру, являются никель, марганец, медь, азот и углерод. При достаточном их содержании сталь не претерпевает фазовых превращений и сохраняет аустенитную структуру при охлаждении до комнатной температуры.

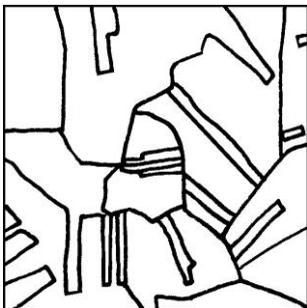


Рисунок .5.- Схема микроструктуры легированной стали аустенитного класса марки 12X18H9T после закалки от 1050°C в воде. Аустенит.  $\times 600$ . (Травление в электролите, содержащем 10 г щавелевой кислоты и 100 мл воды, при плотности тока 0,1 А/см<sup>2</sup> в течение 35-45 с)

Для аустенитной структуры характерно наличие внутри зерен прямолинейных границ двойникования. На рисунке 5 показана структура стали 12X18H9T закаленном состоянии. При медленном охлаждении от 1050°C из аустенита выделяются по границам зерен карбиды, снижающие механические свойства. Поэтому стали аустенитного класса часто применяются в однофазном состоянии. аустенита, которое получается пу-

тем растворения карбидов при нагреве и последующей закалки в воде. Стали аустенитного класса в зависимости от химического состава могут быть нержавеющейими (12X18H9T, 08X18H12T, 04X18H10), жаропрочными (08X18H10T, 45X14H14B2M),



износостойкими (Г13), а также обладать другими особыми свойствами.

Жаропрочность определяется силами межатомного взаимодействия при повышенных температурах, а так как плотность упаковки атомов в аустените максимальная, то стали аустенитного класса обладают наибольшей жаропрочностью. Хром и никель являются основными легирующими компонентами этих сталей. Хром определяет окалиностойкость, а никель - устойчивость аустенита.

В хромоникелевых нержавеющей сталих из-за наличия углерода могут образоваться специальные карбиды, преимущественно типа  $M_{23}C_6$ . Выделение карбидов происходит по границам зерен, что при определенных условиях приводит к появлению особого вида коррозионного разрушения по границам зерен, называемого межкристаллитной коррозией.

Благодаря аустенитной структуре эти стали немагнитны, имеют высокую пластичность и многие из них хорошо штампуются в холодном состоянии.

б. Ферритного класса стали имеют высокую концентрацию легирующих элементов, сужающих область аустенита и расширяющих область феррита. К таким элементам относятся: хром, кремний, алюминий, молибден, вольфрам, ванадий, титан и другие.

Для получения перлитной структуры сталь должна иметь минимальное (до 0,1-0,2%) содержание углерода, расширяющего область аустенита. Структура этих сталей состоит, в основном, из легированного феррита, не превращающегося в аустенит при нагреве вплоть до температуры плавления. На рисунке 6 показана микроструктура трансформаторной стали марки Э42, которая вследствие низкого содержания углерода (менее 0,05%) и высокой концентрации кремния (3,8-4,8%) не имеет аллотропического превращения  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  и поэтому относится к ферритному классу.

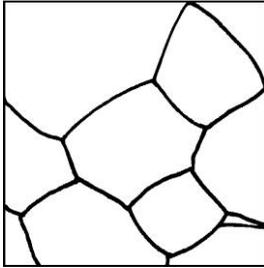


Рисунок 6.- Схема микроструктуры легированной стали ферритного класса марки Э42. Феррит.  $\times 600$

Электротехническая сталь имеет по ГОСТу специальную маркировку. Первая цифра за буквой Э показывает примерное содержание кремния в %. Вторая цифра характеризует уровень электротехнических и магнитных свойств (чем цифра больше, тем свойства выше). Кремний, растворяясь в феррите, резко увеличивает электросопротивление и тем самым снижает потери на вихревые токи и гистерезис.

При высоком содержании хрома, кремния и алюминия стали ферритного класса являются жаростойкими (окалиностойкими), так как эти элементы способны образовывать на поверхности детали плотные пленки окислов, препятствующие проникновению кислорода и образованию окалины. К жаростойким относятся стали марок X17, OX17T, X25T, X28, 1X12CЮ, X18CЮ и другие. Стали ферритного класса в качестве жаропрочных не применяются, так как феррит имеет более низкую плотность упаковки атомов в решетке, чем аустенит. Благодаря ферритной структуре, эти стали обладают ферромагнитными свойствами.

2.2. Микроструктура легированных сталей после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния

1. Перлитного класса стали имеют сравнительно малое содержание легирующих элементов, вследствие чего их критическая скорость закалки оказывается выше скорости охлаждения на воздухе. Поэтому при охлаждении на воздухе происходит распад аустенита диффузионным путем с образованием перлитных структур (перлит, сорбит или троостит), которые отличаются друг от друга различной дисперсностью пластин карбидов и легированного феррита.

К сталям перлитного класса относится большинство конструкционных и инструментальных сталей: 20X, 40X, 30XГСА, X, XГ, XВГ, 9XC и другие. На рисунке 1,б показана микроструктура стали 30XГСА в нормализованном состоянии. При ускоренном охлаждении на воздухе весь феррит не успевает выделиться из аустенита, который превращается в сорбит. Поэтому после нормализации зерен феррита значительно меньше, чем после полного отжига.



2. Мартенситного класса стали содержат больше легирующих элементов по сравнению со сталями перлитного класса. Легирующие элементы, повышая устойчивость переохлажденного аустенита к распаду, настолько снижают критическую скорость закалки, что она оказывается меньше скорости охлаждения на воздухе.

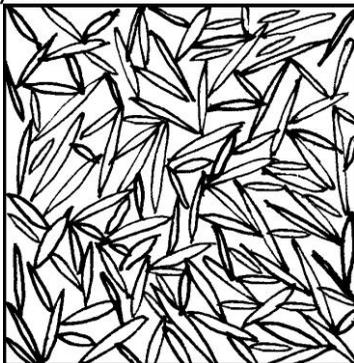


Рисунок 7.- Схема микроструктуры легированной стали мартенситного класса марки 20X13 после нормализации от 1050<sup>0</sup>С. Мартенсит и остаточный аустенит.  $\times 600$ . (Травление в электролите, содержащем 5-10 г щавелевой кислоты и 100 мл воды, при плотности тока 0,1 А/см<sup>2</sup> в течение 60-80 с)

относятся стали марок 12X18H9Т, Г13, 45X14H14В2М и другие (см. рисунок 5).

4. Для сталей карбидного класса условным признаком является уже не основная структура образца диаметром 15-20 мм, охлажденного на воздухе от аустенитного состояния, а присутствие значительного количества карбидов, которые образуются при наличии в стали большого количества углерода и карбидообразующих легирующих элементов.

Легирующие элементы, растворяясь в цементите, способны образовывать легированный цементит, например, (Fe,Mo)<sub>3</sub>C, (Fe,Cr)<sub>3</sub>C, (Fe,W)<sub>3</sub>C. Легированный цементит и специальные карбиды типа M<sub>6</sub>C, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (где М - карбидообразующие элементы), например, Fe<sub>3</sub>Mo<sub>3</sub>C, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, имеющие сложную кристаллическую решетку, построенную из закономерно расположенных атомов металла и углерода, относятся к карбидам первой группы.

Поэтому при охлаждении на воздухе сталь закаливается на мартенситную структуру (рисунок 7). К мартенситному классу относятся стали марок 20X2H4А, 20X13, 30X13, 50X13, P9, P6M5, P18 и другие.

3. Аустенитного класса стали содержат большое количество легирующих элементов, которые снижают температуру начала мартенситного превращения в область отрицательных температур и настолько повышают устойчивость аустенита, что он после охлаждения на воздухе совершенно не распадается при комнатной температуре. К аустенитному классу



## Физическое и прикладное материаловедение

Металлы, для которых отношение атомного радиуса углерода (0,079 нм) к их собственному радиусу меньше 0,59, способны образовывать специальные карбиды типа  $M_2C$  и  $MC$  ( $MO_2C$ ,  $W_2C$ ,  $WC$ ,  $VC$ ,  $TiC$  и другие), являющиеся фазами внедрения. Эти карбиды имеют сравнительно простую кубическую или гексагональную решетку, построенную из атомов металла, а атомы углерода внедрены в нее. Карбиды, представляющие фазы внедрения, относятся ко второй группе.

Однако в чистом виде перечисленные карбиды в сталях не существуют. Все они растворяют железо, а при наличии нескольких карбидообразующих элементов – и эти элементы. Так, в хромомарганцовистой стали вместо специального карбида хрома  $Cr_{23}C_6$  образуется сложный карбид  $(Cr, Mn, Fe)_{23}C_6$ , содержащий в твердом растворе железо и марганец.

Следует отметить, что фазы внедрения значительно труднее растворяются в аустените при нагревании, чем карбиды первой группы и тем более, чем простой цементит  $Fe_3C$ . Поэтому для растворения карбидов в аустените легированные стали нагревают при термической обработке до более высоких температур, чем углеродистые стали.

Карбиды повышают износостойкость, твердость и режущие свойства легированных сталей. К карбидному классу относятся инструментальные стали, например, марок P9, P18, X12, X12Ф1, XB5 и многие другие (см. рисунок 4).

5. Ферритного класса стали имеют минимальное содержание углерода при большом количестве легирующих элементов, расширяющих область  $\alpha$ -железа (феррита). Такие стали кристаллизуются с образованием структуры легированного феррита, который ни при охлаждении, ни при нагревании не превращается в аустенит (см. рисунок 6).

### 3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 3.1. Уясните цель работы.
- 3.2. Изучите сущность легирования стали, классификацию легирующих элементов, особенности маркировки и принципы классификации легированной стали по составу, назначению, структуре в равновесном состоянии и после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния.
- 3.3. Сопоставьте микроструктуру легированных сталей.
- 3.4. Изобразите схемы микроструктур различных классов легированной стали.
- 3.5. Выполните микроструктурный анализ различных классов ле-



гированной стали.

3.6. Составьте отчет о работе.

#### **4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

- Цель работы.
- Определение легированной стали.
- Классификация легирующих элементов.
- Особенности маркировки легированных сталей.
- Принципы классификации легированной стали по структуре в равновесном состоянии и после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния.
- Схемы микроструктур различных классов легированной стали.
- Микроструктурный анализ различных классов легированной стали.

–

#### **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

- 1. Какие стали называются легированными?
- 2. Какие легирующие элементы являются карбидо- и некарбидообразующими?
- 3. Как маркируются легированные стали?
- 4. По каким признакам классифицируют легированную сталь?
- 5. На какие группы подразделяются легированные стали по назначению?
- 6. На какие классы делятся легированные стали по структуре в равновесном состоянии?
- 7. Какие легирующие элементы содержат стали аустенитного и ферритного классов?
- 8. На какие классы делятся легированные стали по структуре после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния?
- 9. Какие стали относятся к ледебуритному классу?
- 10. Какие стали относятся к карбидному классу?

–

#### **РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гуляев А.П. Металловедение.- М.: Металлургия, 1986. 544 с.
2. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов.- М.: Металлургия, 1984. 360 с.



## Лабораторная работа №2 МИКРОСТРУКТУРА ЧУГУНА

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучение микроструктуры чугуна.

### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Чугуном называется железоуглеродистый сплав с содержанием углерода более 2,14% (последние данные 2,06%).

Промышленный чугун, кроме основных компонентов железа и углерода, содержит постоянные примеси (кремний, марганец, серу, фосфор и др.), как правило, в больших количествах, чем углеродистая сталь.

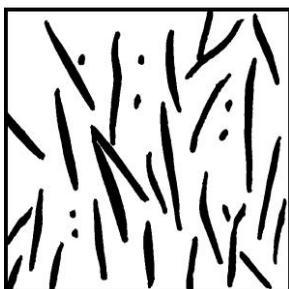
Основой для изучения чугуна, как и стали, являются диаграммы состояния систем железо-цементит и железо-графит.

В зависимости от скорости охлаждения, содержания примесей, модифицирования и последующей термической обработки может быть получен чугун белый, серый, ковкий, высокопрочный.

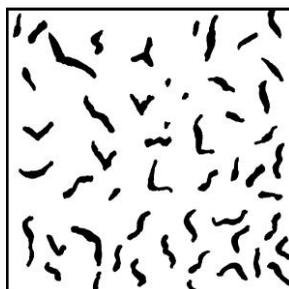
Белый чугун не содержит графита; в его структуре углерод полностью находится в химически связанном состоянии в виде цементита (карбида железа –  $Fe_3C$ ).

В структуре серого, ковкого и высокопрочного чугуна углерод частично или полностью находится в свободном состоянии в виде графита различной формы. В сером чугуне форма графита пластинчатая (рисунок 1,а,б); в ковком - хлопьевидная (рисунок 1,в); в высокопрочном - шаровидная (рисунок 1,г).

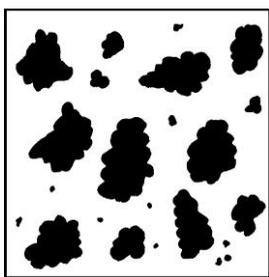
При нормальной (комнатной) температуре чугун состоит из следующих фаз - феррита, цементита и графита, образующих однофазные - феррит, цементит, графит и двухфазные структурные составляющие - перлит, ледебурит.



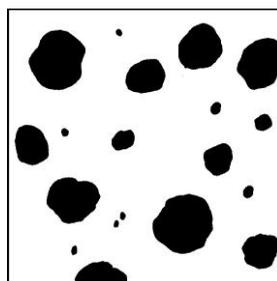
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.- Схемы микроструктур серого (а - крупный прямолинейный пластинчатый графит; б - мелкий завихренный пластинчатый графит), ковкого (в - хлопьевидный графит), высокопрочного (г - шаровидный графит) в нетравленном состоянии,  $\times 135$

Феррит представляет собой ограниченный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе, имеет объемно центрированную кубическую кристаллическую решетку, твердость HB600...800 МПа, очень пластичен, ферромагнитен до температуры  $768^{\circ}\text{C}$ . На диаграмме состояния железо-цементит занимает две области ANH и GPQ. Максимальное содержание углерода в феррите составляет 0,025% при температуре  $727^{\circ}\text{C}$  (точка P диаграммы) и 0,0067% при нормальной температуре (точка Q диаграммы). Микроструктура феррита состоит из однородных зерен светлой или зачастую различной окраски, что объясняется неодинаковой травимостью зерен, срезанных по различным кристаллографическим плоскостям при изготовлении микрошлифа (анизотропия свойств кристаллов).

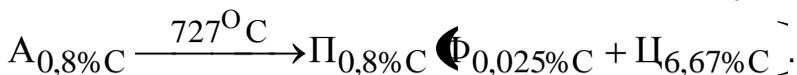
Цементит - химическое соединение  $\text{Fe}_3\text{C}$  представляет собой карбид железа, содержащий 6,67% углерода, имеет сложную



## Физическое и прикладное материаловедение

кристаллическую решетку с плотной упаковкой атомов, обладает высокой твердостью  $HV10000$  МПа и хрупкостью. После обычного травления с использованием универсального реактива - 4% раствора азотной кислоты в этиловом спирте - цементит, как и феррит просматривается в микроскопе в виде светлых участков. Вследствие слабой растворимости цементита в кислотах его участки в структуре выступают над окружающим ферритом и остаются более гладкими и блестящими по сравнению с ферритом. Для четкого выявления цементита можно применять специальное травление пикратом натрия, после которого цементит окрашивается в темный цвет, а феррит остается светлым. Различают первичный цементит ( $Ц_I$ ), кристаллизующийся из жидкой фазы в виде игл или пластин у сплавов, содержащих более 4,3% углерода; вторичный ( $Ц_{II}$ ), выделяющийся при вторичной кристаллизации из аустенита по границам его зерен у сплавов с содержанием углерода более 0,8%; третичный ( $Ц_{III}$ ), выделяющийся при кристаллизации из феррита по границам его зерен в виде сетки у всех сплавов с содержанием углерода более 0,0067%. Начало первичной кристаллизации цементита соответствует температурам линии DC диаграммы состояния железо-цементит ( $1252-1147^{\circ}C$ ), начало выделения вторичного цементита - температурам линии ES ( $1147-727^{\circ}C$ ), начало выделения третичного цементита - температурам линии PQ ( $727-20^{\circ}C$ ).

Перлит представляет собой эвтектоидную смесь двух фаз - феррита и цементита, которая образуется при температуре линии PSK диаграммы ( $727^{\circ}C$ ) в результате эвтектоидного превращения по реакции



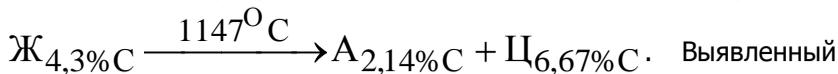
В зависимости от формы цементита различают пластинчатый перлит с межпластиночным расстоянием более 0,3 мкм, получаемый в результате отжига, и зернистый, получаемый путем специальной термической обработки. Твердость HB пластинчатого и зернистого перлита составляет соответственно 2000-2500 МПа и 1600-2200 МПа и зависит от степени измельченности (дисперсности) цементита. Другие характеристики механических свойств перлита также обуславливаются свойствами его фазовых составляющих и зависят от степени дисперсности цементита. Чем крупнее составляющие перлит пластины цементита и феррита, тем ниже уровень его механических свойств, причем у крупнопластинчатого перлита снижаются характеристики прочности и пла-



стичности.

После обычного травления пластинчатый перлит под микроскопом просматривается в виде чередующихся светлых пластинок феррита и цементита, причем ширина цементитных пластинок приблизительно в 7 раз меньше ширины пластинок феррита. При уменьшении увеличения микроскопа в связи со слиянием растравленных границ между ферритом и цементитом последний просматривается в виде темных пластин, почему очень часто на схеме микроструктуры перлит изображают в виде чередующихся светлых пластинок феррита и темных пластинок цементита. При совсем малых увеличениях перлит просматривается в виде зерен серого цвета. Зернистый перлит под микроскопом просматривается в виде светлых включений цементита округлой формы на светлом фоне феррита. Строение перлита целесообразно рассматривать при увеличениях не менее 500 раз.

Ледебурит представляет собой двухфазную смесь аустенита (или перлита) и цементита. Ледебурит - эвтектическая двухфазная смесь аустенита и цементита - образуется при температуре линии ECF (1147°C) диаграммы в результате эвтектического превращения по реакции



Выявленный металлографически как смесь, ледебурит по своей природе представляет собой бикристаллическое образование, двухфазный бикристалл.

При дальнейшем охлаждении в соответствии с линией ES диаграммы происходит выделение из аустенита вторичного цементита и после достижения аустенитом эвтектоидного состава при температуре линии PSK (727°C) - эвтектоидное превращение, в связи с чем при температурах ниже 727°C ледебурит представляет собой двухфазную смесь перлита и цементита. Ледебурит тверд ( $\approx$  HB7000 МПа) и хрупок. Под микроскопом ледебурит просматривается в виде темных включений перлита на светлом фоне цементита.

Графит представляет собой аллотропическую модификацию углерода с кристаллической решеткой типа гексагональной, имеет слоистое строение, ничтожно малые значения прочностных характеристик, его влияние на металлическую основу чугуна сказывается подобно действию надрезов. Графит обладает смазывающим действием, усиливает демпфирующие свойства, под микроскопом имеет вид темных включений.



## Физическое и прикладное материаловедение

Все чугуны, кроме белого, получают в результате графитизации и, как конструкционный материал, находят широкое применение в машиностроении.

Процесс кристаллизации графита как из жидкой фазы при затвердевании чугуна, так и из твердой фазы (аустенита) называется графитизацией.

Образование структуры чугуна в процессе графитизации можно рассматривать по двойной - совмещенной диаграмме состояния систем железо-графит и железо-цементит, а также с успехом можно объяснить по диаграмме состояния железо-цементит.

На процесс кристаллизации графита, в основном, оказывают влияние химический состав чугуна и скорость охлаждения.

Химические элементы, входящие в состав чугуна, оказывают различное влияние на процесс графитизации.

Углерод способствует процессу графитизаций чугуна. Кремний - графитообразующий элемент - способствует кристаллизации графита из жидкого и твердого растворов или разложению цементита при нагреве по реакции  $C \rightarrow A + G$ . Наличие в чугуне элементов - алюминия, никеля, меди, оксидов  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , нитридов  $AlN$ ,  $BN$ , нерастворившихся частиц графита, также благоприятно влияет на графитизацию чугуна. Сера и марганец при повышенном содержании тормозят образование графита и, подобно ускоренному охлаждению, вызывают "отбел" в чугуне (кристаллизацию цементита).

Быстрое охлаждение препятствует графитизации чугуна. Медленное охлаждение оказывает положительное влияние на процессы графитизации и чем меньше скорость охлаждения, тем более полно они завершаются. Поэтому для получения структуры серого чугуна в его состав вводится 2,5-4% углерода, 1-4% кремния и осуществляется медленное охлаждение отливок в литейных формах. При затвердевании и медленном охлаждении серого чугуна графит пластинчатой формы выделяется как из жидкой фазы, так и из твердого раствора - аустенита. Структура чугуна после графитизации, разумеется, будет состоять из металлической основы и неметаллических графитных включений. Металлическая основа чугуна после графитизации определяется по диаграмме состояния железо-цементит в зависимости от содержания в чугуне оставшегося связанного углерода в виде цементита.

В железоуглеродистых сплавах, кроме описанного процесса образования графита при кристаллизации серого чугуна, возможен и другой путь графитизации. Образовавшийся в структуре



белого чугуна цементит является неустойчивым (нестабильным) соединением и при определенных условиях (нагреве) может распадаться с образованием аустенита и графита. Поэтому в белом чугуне при температуре выше линии PSK и соответствующей выдержке будет происходить графитизация - распад цементита, растворение атомов углерода в аустените, диффузия атомов углерода к центрам кристаллизации и рост графитных включений хлопьевидной формы. В результате структура будет состоять из зерен аустенита и графитных включений. При дальнейшем достаточно медленном охлаждении  $10-20^{\circ}/\text{час}$  можно добиться распада аустенита с образованием феррито-графитной структуры ковкого чугуна. Если скорость охлаждения будет значительно выше, аустенит переохладится до линии PSK ( $727^{\circ}\text{C}$ ) и превратится в перлит. В этом случае путем замедленного охлаждения или длительной изотермической выдержки ниже линии PSK можно достигнуть полного разложения эвтектоидного цементита, входящего в перлит, и получения также структуры ковкого чугуна с ферритной металлической основой и хлопьевидным графитом.

Процесс графитизации при надлежащих температурах широко используется для регулирования металлической основы и свойств высокопрочного чугуна.

## **2. МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЧУГУНА**

### **2.1. Микроструктура белого чугуна**

В соответствии с диаграммой состояния железо-цементит белый чугун может быть доэвтектическим с содержанием углерода менее 4,3%, эвтектическим при 4,3% углерода и заэвтектическим с концентрацией углерода более 4,3%.

При охлаждении доэвтектического состава из жидкого состояния до линии ликвидус BC никаких превращений не происходит. От температур линии ликвидус BC до линии солидус EC кристаллизуется аустенит переменного состава, что приводит (при  $1147^{\circ}\text{C}$ ) к увеличению содержания в жидком чугуне углерода до 4,3% и эвтектическому превращению, при котором происходит одновременная кристаллизация из жидкости двух фаз - аустенита с концентрацией 2,14% C и цементита, приводящая к образованию ледебурита. Дальнейшее охлаждение, за счет выделения вторичного цементита в соответствии с линией ES сопровождается снижением содержания углерода в аустените до 0,8% C, эвтектоидным превращением по линии PSK, в результате чего микроструктура доэвтектического белого чугуна ниже  $727^{\circ}\text{C}$ , состоит из перлита в виде темных участков, ледебурита в виде темных точечных перлитных включений на белом фоне цементита и вто-



ричного цементита, который может быть в виде светлых отдельных включений и игл, и может сливаться с цементитом ледебурита (рисунок 2). С увеличением содержания углерода в чугуне количество ледебурита возрастает, а перлита уменьшается.

Микроструктура эвтектического белого чугуна состоит из ледебурита, представляющего собой при температурах выше линии PSK ( $727^{\circ}\text{C}$ ) смесь аустенита и цементита (эвтектического и вторичного), а ниже - смесь перлита и цементита (рисунок 3).

Микроструктура заэвтектического белого чугуна состоит из крупных светлых пластин первичного цементита и ледебурита (рисунок 4).

В результате кристаллизации первичного цементита ниже линии DC диаграммы жидкий чугун обезуглероживается и при температуре  $1147^{\circ}\text{C}$  (линия ECF) с содержанием углерода 4,3% затвердевает в эвтектику - ледебурит, которая при нормальной температуре представляет собой смесь перлита и цементита; с повышением содержания углерода в заэвтектическом чугуне количество первичного цементита возрастает, количество ледебурита уменьшается.



Рисунок 2.- Схема микроструктуры доэвтектического белого чугуна. Ледебурит и перлит.  $\times 350$



Рисунок 3.- Схема микроструктуры эвтектического белого чугуна. Ледебурит.  $\times 350$

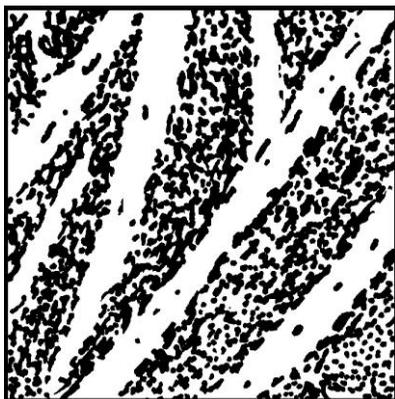


Рисунок 4.- Схема микроструктуры заэвтектического белого чугуна. Ледебурит и первичный цементит.  $\times 350$

Высокое содержание эвтектического, первичного и вторичного цементита в белом чугуне придает ему высокую твердость, хрупкость и износостойкость. Белый чугун очень плохо обрабатывается режущим инструментом. Применяется при литье только износостойких отливок, не требующих обработки (шары для шаровых мельниц, прокатные валки, вагонные колеса с отбеленным

ободом и некоторые другие). Белый чугун своим названием обязан матово-белому цвету излома.

## 2.2. Микроструктура серого чугуна

Серый чугун, как уже было отмечено, получается непосредственно в процессе кристаллизации из жидкого состояния при медленном охлаждении в литейных формах.

В структуре серого чугуна ледебурит отсутствует, а углерод находится в форме пластинчатого графита (в виде прожилок, лепестков, чешуек).

Металлическая основа (матрица) серого чугуна зависят от количества связанного углерода (цементита), оставшегося в структуре после графитизации.

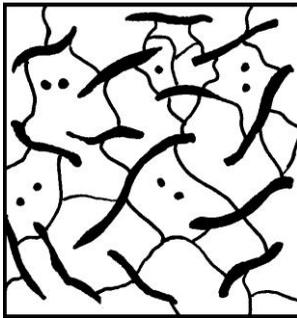


Рисунок 5.- Схема микроструктуры ферритного серого чугуна. Феррит и пластинчатый графит.  $\times 200$



Рисунок 6.- Схема микроструктуры перлитного серого чугуна. Перлит и пластинчатый графит.  $\times 600$

Если связанного углерода почти нет, то металлическая основа - ферритная, если связанного углерода 0,8% - перлитная, если меньше 0,8% - феррито-перлитная. Соответственно и чугун называют ферритным (рисунок 5), перлитным (рисунок 6), феррито-перлитным (рисунок 7).

Кроме указанных структурных составляющих в сером чугуне, благодаря повышенному содержанию фосфора и ликвиции его, часто образуются участки фосфидной эвтектики характерного точечного строения. Фосфидная эвтектика состоит из феррита, цементита и фосфида железа  $Fe_3P$ . Крупные образования фосфидной эвтектики сильно увеличивают хрупкость чугуна.



Рисунок 7.- Схема микроструктуры феррито-перлитного серого чугуна. Феррит, перлит и пластинчатый графит.  $\times 200$

Пластинчатая форма графита в значительной степени разупрочняет металлическую основу и придает серому чугуну повышенную хрупкость.

Серый чугун хорошо обрабатывается режущим инструментом. Отливки из серого чугуна производятся в соответствии с ГОСТ 1412-79. По серому цвету излома чугун называется серым.



### 2.3. Микроструктура ковкого чугуна

Ковкий чугун получается путем отжига (графитизации) белого доэвтектического чугуна. В зависимости от режима отжига металлическая основа так же, как и у серого чугуна, может быть ферритной (рисунок 8), перлитной (рисунок 9) и феррито-перлитной (рисунок 10).

При отжиге белого чугуна графит кристаллизуется в виде хлопьев и называется графитом отжига (см. рисунок 1,в).

Ковкий чугун, благодаря равновероятной форме хлопьев, снижающей концентрацию напряжений, обладает повышенными характеристиками прочности и пластичности. Марки механических свойств ковкого чугуна предусмотрены ГОСТ 1215-79.

Несмотря на название, ковкий чугун практически не куется, но может, в случае коробления отливок, подвергаться рихтовке.

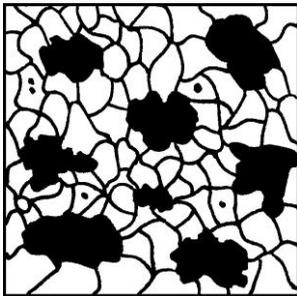


Рисунок 8.- Схема микроструктуры ферритного ковкого чугуна. Феррит и хлопьевидный графит.  $\times 200$

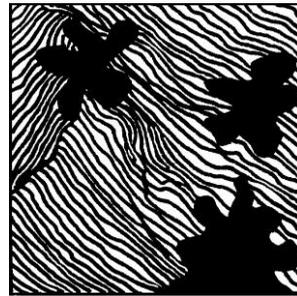


Рисунок 9.- Схема микроструктуры перлитного ковкого чугуна. Перлит и хлопьевидный графит.  $\times 600$

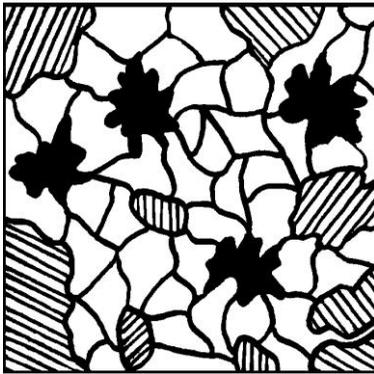


Рисунок 10.- Схема микроструктуры феррито-перлитного ковкого чугуна. Феррит, перлит и хлопьевидный графит.  $\times 200$

#### 2.4. Микроструктура высокопрочного чугуна

Получение высокопрочного чугуна основано на обработке (модифицировании) серого чугуна в жидком состоянии присадками магния, церия.

От степени графитизации (количества оставшегося связанного углерода в структуре) металлическая основа чугуна с шаровидным графитом может быть ферритной (рисунок 11),

феррито-перлитной (рисунок 12) и перлитной (рисунок 13).

Таким образом, у серого, ковкого и высокопрочного чугуна металлической основой является сталь, разобшенная графитными включениями различной формы.

Чугун с шаровидным графитом обладает высокими механическими свойствами и называется высокопрочным (ГОСТ 7293-79).

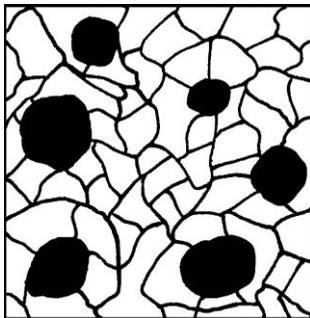


Рисунок 11.- Схема микроструктуры ферритного высокопрочного чугуна. Феррит и шаровидный графит.  $\times 200$

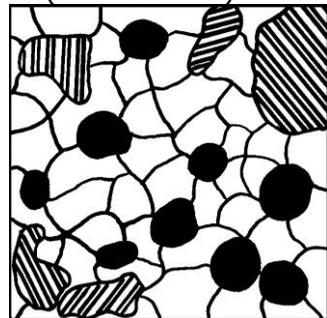


Рисунок 12.- Схема микроструктуры феррито-перлитного высокопрочного чугуна. Феррит, перлит и шаровидный графит.  $\times 200$

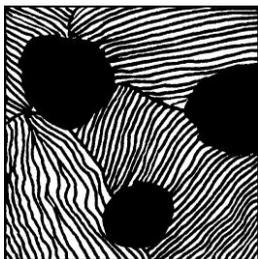


Рисунок 13.- Схема микро-  
структуры перлитного высоко-  
прочного чугуна. Перлит и  
шаровидный графит.  $\times 600$

### 3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 3.1. Уясните цель работы.
- 3.2. Сопоставьте, каким образом получают различные виды чугуна.
- 3.3. Изучите микроструктуру чугунов при нормальной температуре (альбом, с.13-16).
- 3.4. Изобразите схемы микроструктур различных видов чугуна в нетравленном состоянии и после травления универсальным реактивом - 4% раствором азотной кислоты в этиловом спирте.
- 3.5. Выполните микроструктурный анализ различных видов чугуна.
- 3.6. Проследите за формированием структуры одного из сплавов белого чугуна при охлаждении из жидкого состояния.
- 3.7. Составьте отчет о работе.

### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- Цель работы.
- Определение чугуна.
- Классификация чугуна.
- Определение структурных составляющих чугуна.
- Характеристика белого, серого, ковкого, высокопрочного чугунов, особенности их получения, структуры и свойств.
- Схемы микроструктур чугуна.
- Микроструктурный анализ чугуна.
- Схемы вероятных микроструктур одного из сплавов белого чугуна при охлаждении из жидкого состояния.

### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Какой сплав называется чугуном?



## Физическое и прикладное материаловедение

- 2. Назовите виды чугуна.
- 3. Какой чугун называется белым?
- 4. Какова форма графитовых включений в сером, ковком и высокопрочном чугуне?
- 5. Что представляют собой структурные составляющие чугуна - феррит, цементит, перлит, ледебурит, графит и какими основными свойствами они обладают?
- 6. Какие факторы влияют на процесс графитизации чугуна?
- 7. Какая металлическая основа может быть у чугунов, содержащих графит, и от чего она зависит?
- 8. Что представляет собой фосфидная эвтектика и в каком чугуне она встречается?
- 9. Какой процесс называется графитизацией?
- 10. Какие факторы влияют на процесс графитизации?

### **РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гуляев А.П. Металловедение.- М.:Металлургия, 1986. 544 с.
2. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка.- М.:Металлургия, 1984. 360 с.
3. Геллер П.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение.- М.:Металлургия, 1989. 456 с.



## Лабораторная работа №3 МИКРОСТРУКТУРА ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Диаграммы состояния определяют фазовый состав и структуру сплавов в условиях равновесия, дают возможность решать вопросы их упрочнения путем термической обработки и поэтому являются основой классификации сплавов цветных металлов. По технологическим свойствам сплавы делят на деформируемые, находящиеся в состоянии твердых растворов и хорошо обрабатываемые давлением, и литейные, имеющие в структуре эвтектику и обладающие наилучшей жидкотекучестью. По способности упрочняться с помощью термической обработки цветные сплавы подразделяют на неупрочняемые и упрочняемые термической обработкой - закалкой без полиморфного превращения и старением.

Упрочняемыми термической обработкой являются сплавы, для которых характерно уменьшение растворимости компонентов в твердом состоянии при снижении температуры до нормальной (комнатной). В промышленности широкое применение находят как двойные, тройные, так и поликомпонентные сплавы цветных металлов, фазовый состав и структура которых в условиях равновесия определяются соответствующими диаграммами состояния. Несмотря на это, при небольшом содержании легирующих элементов в большинстве случаев вполне достаточным для качественного описания изменений фазового состава, структуры является использование наглядных двойных диаграмм состояния "цветной металл - основной легирующий элемент". В соответствии с подобной диаграммой "алюминий - легирующий элемент" (рисунок 1) сплавы с содержанием легирующего элемента до проекции точки В на ось концентраций являются деформируемыми, а с большим содержанием - литейными. При этом сплавы с содержанием легирующего элемента до точки D не упрочняются в результате термической обработки, а сплавы с большим содержанием являются упрочняемыми термической обработкой. Наиболее широко распространены цветные сплавы на основе алюминия, меди, магния, олова.

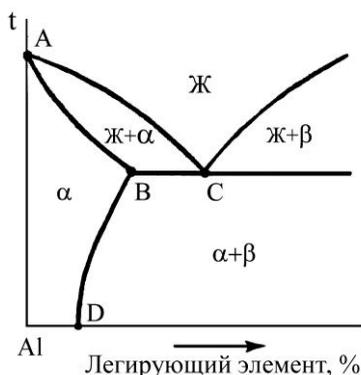


Рисунок 1.- Фрагмент диаграммы состояния системы алюминий - легирующий элемент

Алюминиевые сплавы в соответствии с диаграммой состояния "алюминий - легирующий элемент" (см. рисунок 1) делят на деформируемые и литейные. Промышленное применение находят как двойные деформируемые сплавы алюминия с медью, магнием, марганцем, кремнием, так и поликомпонентные сплавы систем Al-Cu-Mg (дуралюмины), Al-Cu-Si (авиали) и др. Значительное место среди

этих сплавов занимают дуралюмины, маркируемые буквой Д и цифрами, характеризующими порядковый номер сплава по ГОСТ 4784-74, например, Д1, Д6, Д16.

Наиболее распространенный из них сплав марки Д1 содержит в качестве легирующих элементов 3,8-4,8%Cu; 0,4-0,8%Mg; 0,4-0,8%Mn. Дуралюмины относятся к сплавам, упрочняемым термической обработкой. К литейным относятся сплавы алюминия с кремнием, медью, магнием. Литейные сплавы маркируются буквами АЛ и цифрами, обозначающими порядковый номер сплава (ГОСТ 2685-75), например, АЛ2, АЛ3. Наибольшее распространение получили силумины (сплавы алюминия с кремнием), содержащие от 5 до 13% Si. Фазовый состав, структуру и свойства силуминов можно варьировать изменением химического состава, модифицированием - введением веществ, которые уже в малых количествах (обычно не более десятых долей процента) способствуют кристаллизации структурных составляющих в измельченной форме, а также термической обработкой. В качестве модифицирующих добавок используются марганец, никель, хром, титан, ванадий, и некоторые другие элементы. Силумины обычно модифицируют натрием, который в жидкий сплав вводят в виде смеси фтористых и хлористых солей натрия в соотношении  $2/3\text{NaF} + 1/3\text{NaCl}$ .

Важнейшими сплавами на основе меди являются латуни (сплавы меди с цинком) и бронзы (сплавы меди со всеми элементами, кроме цинка). По технологическим свойствам медные сплавы подразделяют на деформируемые и литейные, по спо-



способности упрочняться - на неупрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Двойные деформируемые латуни маркируются буквой Л и цифрой, показывающей среднее содержание меди в процентах (ГОСТ 15527-70), например, Л96, Л90, Л80, Л70, Л62, Л59. Латуни с содержанием меди 90% и более называются томпаком (например, сплав марки Л96), при 80-85% - полутомпаком (Л80). В марках легированных деформируемых латуней кроме цифры, показывающей содержание меди, указываются буквы и цифры, обозначающие легирующий элемент и его содержание в процентах. Например, сплав ЛАН59-3-2 содержит 59%Cu, 3%Al, 2%Ni, остальное Zn. В марках литейных латуней указывается содержание цинка, а содержание каждого легирующего элемента ставится непосредственно за буквой, его обозначающей. Например, сплав ЛЦ40Мц3А содержит 40%Zn, 3%Mn, 1%Al, остальное Cu.

Бронзы по основным легирующим элементам подразделяют на оловянистые, свинцовистые, кремнистые и др. В бронзах в качестве легирующей добавки в небольших количествах может присутствовать и цинк. Деформируемые бронзы маркируют буквами Бр, за которыми следуют буквы и цифры, обозначающие название и содержание в процентах легирующих элементов (ГОСТ 5017-74). Например, сплав БрОЦС4-4-2,5 содержит 4%Sn, 4%Zn, 2,5%Pb, остальное Cu. В марках литейных бронз (ГОСТ 613-73) содержание каждого легирующего элемента указывается сразу после буквы, обозначающей его название. Например, сплав БрО6Ц6С3 содержит 6%Sn, 6%Zn, 3%Pb, остальное Cu.

Магниевые сплавы, легирующими элементами которых являются алюминий, цинк, кремний, а также редкие металлы - неодим, торий и другие, подразделяются на деформируемые и литейные, маркируемые соответствующими буквами МА и МЛ и цифрами, соответствующими номеру сплава (ГОСТ 14957-76 и 2856-79). Магниевые сплавы, как деформируемые, так и литейные, подвергают модифицированию и упрочняющей термической обработке.

Сплавы на основе олова (оловянистые баббиты) являются высококачественными антифрикционными материалами, для которых важным является наличие гетерогенной (неоднородной) структуры, состоящей из мягкой, пластичной основы, обеспечивающей прирабатываемость подшипника к валу, и твердых включений, упрочняющих материалы и препятствующих схватыванию трущихся поверхностей. Оловянистые баббиты представляют собой трехкомпонентные сплавы системы олово-сурьма-



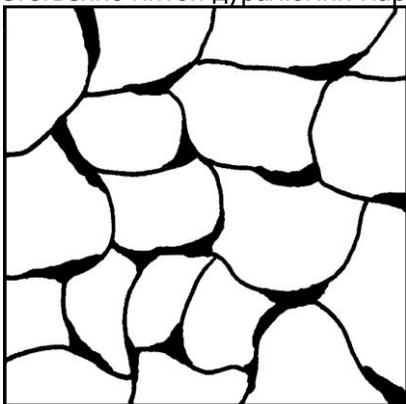
медь. Наиболее широкое применение имеет сплав марки Б83 (ГОСТ 1320-74), содержащий 83%Pb, 11%Sb и 6%Cu.

## 2. МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

Микроструктура цветных сплавов в условиях равновесия или близких к ним может быть определена с помощью их диаграмм состояния.

### 2.1. Микроструктура сплавов на основе алюминия

В качестве характерных представителей деформируемых и литейных алюминиевых сплавов в работе используются соответственно литой дуралюмин марки Д1 и силумин марки АЛ2.



Основу сплавов типа дуралюмин составляет система Al-Cu-Mg. В соответствии с ней медь и магний имеют ограниченную растворимость в твердом состоянии в алюминии, а избыточными фазами, выделяющимися при охлаждении из  $\alpha$ -твердого раствора меди и магния в алюминии в связи с уменьшением растворимости

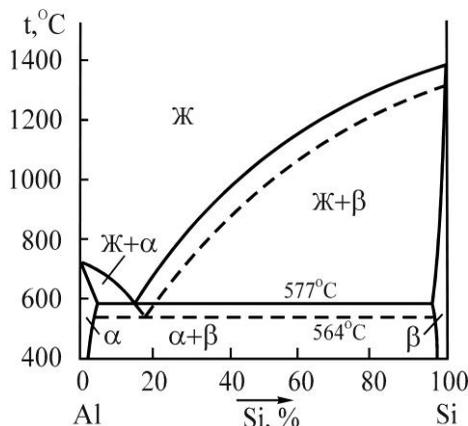
Рисунок 2.- Схема микроструктуры дуралюмина марки Д1 в литом состоянии.  $\alpha$ -фаза и  $\Theta$ -фаза.  $\times 340$

компонентов при снижении температуры являются соединения  $\text{CuAl}_3$  и  $\text{Al}_2\text{MgCu}$ , называемые соответственно  $\Theta$  и S фазами. Поскольку магний в сплаве находится в небольшом количестве, то фаза S при используемых в работе увеличениях микроскопа в структуре не обнаруживается. Поэтому наблюдаемая микроструктура сплава марки Д1 в литом состоянии состоит из светлых зерен  $\alpha$ -твердого раствора меди и магния в алюминии и темных включений  $\Theta$ -фазы (соединения  $\text{CuAl}_2$ ), располагающихся по границам зерен  $\alpha$ -фазы (рисунок 2). Такую структуру дуралюмина марки Д1 можно предсказать, исходя из двойной диаграммы состояния системы Al-Cu, подобной изображенной на рис.1.

Дуралюмины, как и авиали (сплавы системы Al-Cu-Si) применяют для изготовления горячей или холодной обработкой давлением листов, труб, проволоки, плит и различных профилей. Микроструктура силуминов соответствует двойной диаграмме состояния системы Al-Si (рисунок 3), доэвтектические сплавы



состоят из первичных кристаллов  $\alpha$ -твердого раствора кремния в алюминии и зерен эвтектики ( $\alpha+\beta$ ). В свою очередь, структура заэвтектических сплавов состоит из крупных первичных кристаллов - твердого раствора алюминия в кремнии в виде игл и зерен эвтектики ( $\alpha+\beta$ ). В соответствии с диаграммой состояния Al-Si сплав марки АЛ2, содержащий 12-13%Si, является заэвтектическим.



Поэтому его микроструктура состоит из более темных крупных игл  $\beta$ -твердого раствора алюминия в кремнии и эвтектики в виде более темных игл  $\beta$ -твердого раствора алюминия в кремнии на светлом поле  $\alpha$ -твердого раствора кремния в алюминии (рисунок 4). Сплав в таком структурном состоянии обладает низким комплексом механических свойств

Рисунок 3.- Диаграмма состояния системы алюминий – кремний

(предел прочности при растяжении  $\sigma_B=130-140\text{МПа}$ , относительное удлинение  $\delta=1-2\%$ ).

Поэтому для повышения свойств производят модифицирование. Применительно к силуминам оно заключается в обработке перед разливкой сплава смесью фтористых и хлористых солей натрия в соотношении  $2/3\text{NaF}+1/3\text{NaCl}$ . Это обеспечивает введение в сплав 0,1%Na, который осуществляет модифицирующее действие, затрудняя кристаллизацию  $\beta$ -твердого раствора алюминия в кремнии. Модифицирование вызывает смещение линий на диаграмме состояния Al-Si (см. рисунок 3). Эвтектическая точка (11,6%Si) перемещается вправо, приобретая концентрацию кремния 14,6%, в результате чего сплав становится доэвтектическим, что исключает из структуры крупные первичные иглы  $\beta$ -твердого раствора алюминия в кремнии и тем самым повышает пластичность. Линия эвтектического превращения снижается с 577 до 564°C, в связи с чем эвтектика ( $\alpha+\beta$ ) вместо грубоигльчатой становится мелкозернистой. Поэтому микроструктура сплава марки АЛ2 после модифицирования состоит из светлых первичных



зерен  $\alpha$ -твердого раствора кремния в алюминии и мелкозернистой эвтектики в виде более темных включений  $\beta$ -твердого раствора алюминия в кремнии на светлом поле  $\alpha$ -твердого раствора кремния в алюминии (рисунок 5). Силумины применяются для изготовления корпусов компрессоров, картеров и блоков цилиндров двигателей и др.

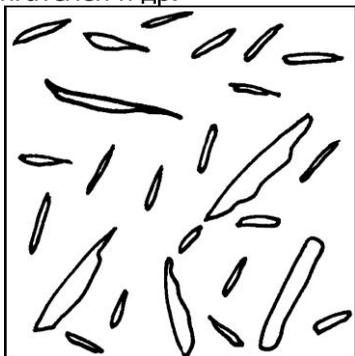


Рисунок 4.- Схема микроструктуры силумина марки АЛ2 до модифицирования,  $\beta$ -фаза и эвтектика ( $\alpha+\beta$ ).  $\times 250$

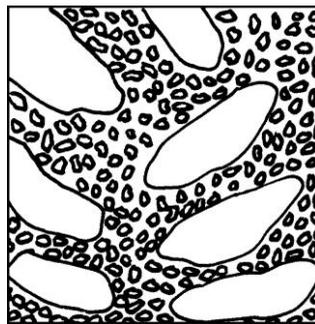


Рисунок 5.- Схема микроструктуры силумина марки АЛ2 после модифицирования.  $\alpha$ -фаза и эвтектика ( $\alpha+\beta$ ).  $\times 250$

## 2.2. Микроструктура сплавов на основе меди

В качестве характерных представителей сплавов на медной основе в работе используются сплавы марок Л68 и Л59 (латуни) и БрО10 и БрС30 (бронзы).

Микроструктура двойных низколегированных латуней в условиях равновесия определяется диаграммой состояния системы Cu-Zn. На рисунке 6 приведен фрагмент этой диаграммы, отражающей фазовые равновесия в сплавах с содержанием цинка до 50%, поскольку промышленное применение находят латуни, содержащие до 45%Zn. В соответствии с этой диаграммой состояния латуни по структуре делятся на однофазные ( $\alpha$ -латуни), содержащие до 39%Zn и состоящие из зерен  $\alpha$ -твердого раствора цинка в меди, и двухфазные ( $\alpha+\beta$ )-латуни, содержащие от 39 до 45%Zn и состоящие из зерен  $\alpha$ -твердого раствора цинка в меди и зерен  $\beta$ -твердого раствора на основе соединения CuZn.

Однофазные  $\alpha$ -латуни обладают высокой пластичностью при нормальной (комнатной) температуре. Поэтому однофазные латуни выпускают в виде полуфабрикатов, полученных холодной обработкой давлением (штамповкой, прокаткой или протяжкой) листов, труб,

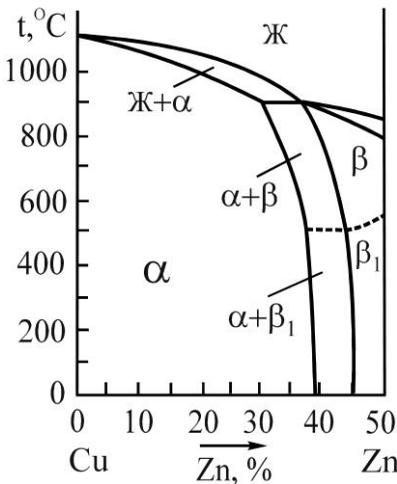


Рисунок 6.- Фрагмент диаграммы состояния системы медь-цинк

лент, проволоки, из которых методом глубокой вытяжки изготавливают радиаторные трубы, снарядные гильзы, сильфоны, трубопроводы, а также производят детали (шайбы, втулки, уплотнительные кольца), не требующие высокой твердости. Холодная обработка вызывает наклеп.

В наклепанном состоянии латунь с содержанием цинка 20% и выше подвержена растрескиванию по границам зерен, имеет низкую коррозионную стойкость. Поэтому ее подвергают рекристаллизационному отжигу, в результате чего однофаз-

ная латунь приобретает зеренную структуру с характерными для пластичных сплавов двойниками. На рисунке 7 показана микроструктура однофазной латуни марки Л68. Поскольку зерна  $\alpha$ -фазы выходят на поверхность микрошлифа различными кристаллографическими плоскостями, степень их травимости реактивом различна и они имеют неодинаковую окраску.

Микроструктура двухфазной латуни марки Л59 в литом состоянии, представленная на рисунке 8, состоит из светлых зерен  $\alpha$ -твердого раствора цинка в меди и темных (более богатых цинком и травящихся сильнее) зерен  $\beta$ -твердого раствора на базе химического соединения CuZn. Присутствие в структуре  $\beta$ - фазы, имеющей низкую пластичность и высокую твердость, повышает характеристики прочности латуней. Двухфазные латуни являются более пластичными при температурах выше 500°C. Поэтому эти латуни выпускают в виде полуфабрикатов, полученных горячей обработкой давлением, - листов, прутков, труб, штамповок, из которых изготавливают втулки, гайки, тройники, штуцеры, токопроводящие детали электрооборудования и др.

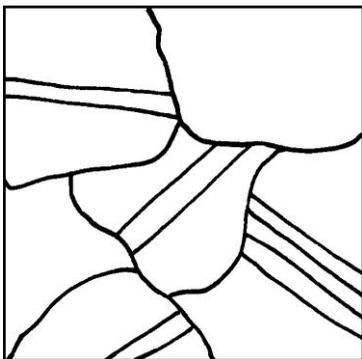


Рисунок 7.- Схема микроструктуры однофазной латуни марки Л68 после холодной пластической деформации и рекристаллизационного отжига,  $\alpha$ -фаза.  $\times 440$

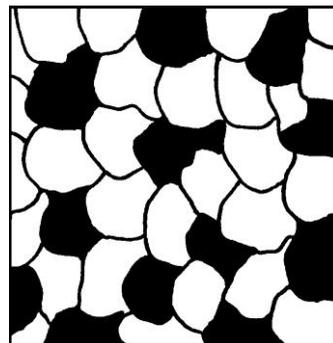


Рисунок 8.- Схема микроструктуры двухфазной латуни марки Л59 в литом состоянии.  $\alpha$ -фаза и  $\beta$ -фаза.  $\times 440$

Легированные латуни применяют в качестве деформируемых и литейных. Последние, как правило, содержат большое количество цинка и легирующих элементов.

В промышленности находят применение как двойные – оловянные, свинцовистые и др. бронзы, так и многокомпонентные, содержащие кроме основных легирующих элементов добавки свинца, цинка, фосфора и никеля.

Микроструктура двойных оловянных бронз определяется диаграммой состояния системы Cu-Sn. На рисунке 9 приведен фрагмент этой диаграммы для сплавов с содержанием олова до 30%, поскольку промышленное применение имеют сплавы, содержащие до 20%Sn. Сплошными линиями показаны границы фазовых областей равновесной системы.

В соответствии с этой диаграммой состояния бронзы по структуре делятся на однофазные, состоящие из зерен  $\alpha$ -твердого раствора олова в меди, и двухфазные, состоящие из зерен  $\alpha$ -твердого раствора олова в меди и зерен эвтектоида ( $\alpha+\delta$ ), в котором  $\delta$ -фаза представляет собой соединение  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ .

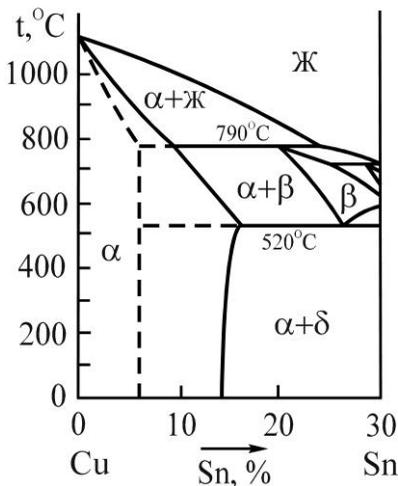


Рисунок 9.- Фрагмент диаграммы состояния системы медь-олово

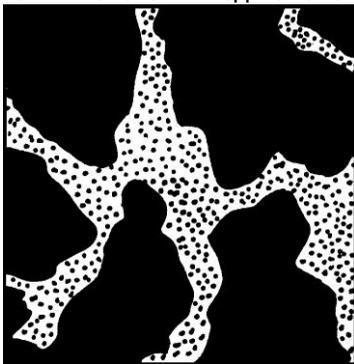


Рисунок 10.- Схема микроструктуры двухфазной бронзы марки БрО10 в литом состоянии.  $\alpha$ -фаза и эвтектоид ( $\alpha+\delta$ ).  $\times 600$

Бронзы, содержащие олово в большом количестве, по структуре являются двухфазными. Микроструктура двухфазной бронзы марки БрО10 состоит из темных зерен  $\alpha$ -твердого раствора олова в меди и зерен эвтектоида ( $\alpha+\delta$ ) (рисунок 10). Основой эвтектоида является  $\delta$ -фаза (химическое соединение  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ), на белом поле которой расположены мелкие темные выделения  $\alpha$ -фазы. Наличие твердой и хрупкой  $\delta$ -фазы исключает возможность обработки давлением, поэтому такие бронзы применяют только в литом состоянии.

Для повышения свойств в оловянистые бронзы вводят

При очень медленном охлаждении протекает равновесная кристаллизация и граница между однофазными и двухфазными бронзами соответствует 14% олова. В реальных заводских условиях при литье в металлические и земляные формы происходит ускоренное охлаждение сплавов, в связи с чем диффузия атомов олова в меди затрудняется и сплавы ведут себя так, как если бы растворимость олова в меди была постоянной, равной 6-8%, и не менялась с температурой (пунктирные линии на рисунок 9). Исходя из этого, однофазными являются бронзы с содержанием олова не более 5-6%. Такие сплавы имеют высокую пластичность и являются деформируемыми.



различные добавки: цинк для улучшения жидкотекучести и повышения плотности отливок; фосфор как раскислитель для устранения нежелательной окиси олова  $\text{SnO}_2$ , присутствующей в бронзах в виде твердых и хрупких включений; свинец для улучшения обрабатываемости резанием и повышения уровня антифрикционных свойств. Оловянистые бронзы с перечисленными добавками находят в промышленности более широкое применение, чем двойные сплавы. В качестве примера можно назвать литейные бронзы марок БрО5Ц5С5, БрО10Ф1 и др., деформируемые бронзы марок БрОФ6,5-0,4, БрОЦ4-3 и др. Оловянистые бронзы используются для изготовления паровой и водяной арматуры, подшипников скольжения, втулок, зубчатых колес, деталей приборов.

Микроструктуру свинцовистых бронз можно охарактеризовать с помощью двойной диаграммы состояния системы Cu-Pb (рисунок 11). Как видно из диаграммы состояния, свинцовистая бронза марки БрС30 с содержанием свинца 30% является доэвтектическим сплавом и его структура при нормальной (комнатной) температуре должна состоять из зерен  $\alpha$ -твердого раствора свинца в меди и эвтектики, состоящей из  $\alpha$ -твердого раствора свинца в меди и  $\beta$ -твердого раствора.

Однако эвтектика по составу совпадает с чистым свинцом (99,98%), а  $\alpha$ -фаза - с чистой медью, поэтому можно сказать, что фактически микроструктура сплава состоит из зерен двух металлов - свинца и меди.

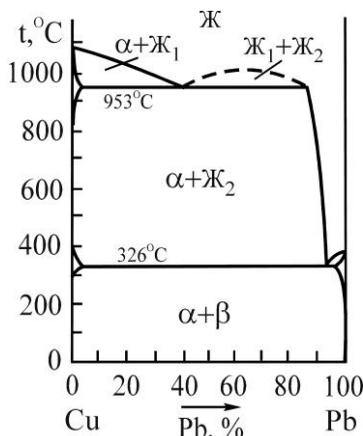


Рисунок 11.- Диаграмма состояния системы медь-свинец

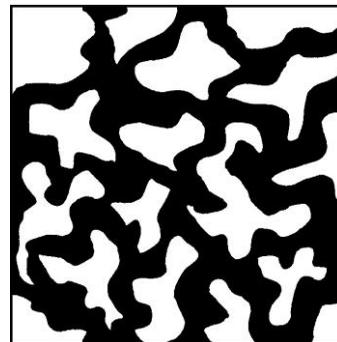


Рисунок 12.- Схема микроструктуры свинцовистой бронзы марки БрС30 в литом состоянии.  $\alpha$ -фаза и эвтектика ( $\alpha + \beta$ ).  $\times 340$



На рисунке 12 представлена микроструктура свинцовистой бронзы марки БрС30, состоящая из светлых зерен  $\alpha$ -фазы (фактически меди) и темных зерен эвтектики (фактически свинца). Свинцовистые бронзы являются высококачественными антифрикционными материалами и применяются для изготовления опорных и шатунных подшипников мощных турбин, авиационных моторов, дизелей и других машин.

### 2.3. Микроструктура сплавов на основе магния

Микроструктура магниевых сплавов в равновесном состоянии определяется соответствующими диаграммами состояния. В качестве примера на рисунке 13 приведена микроструктура сплава МЛ5, содержащего помимо магния 8%Al; 0,8%Zn и 0,3%Mn. Алюминий и цинк введены в сплав для упрочнения, а марганец - для повышения коррозионной стойкости.

Поскольку растворимость цинка в магнии в твердом состоянии составляет не менее 1,7% и, следовательно, все количество цинка входит в твердый раствор, не присутствуя в сплаве как самостоятельная структурная составляющая, а марганцовистая фаза при используемых в работе увеличениях ввиду малого ее количества не выявляется, то микроструктура сплава марки МЛ5 может быть определена в соответствии с двойной диаграммой состояния системы Mg-Al (рисунок 14).

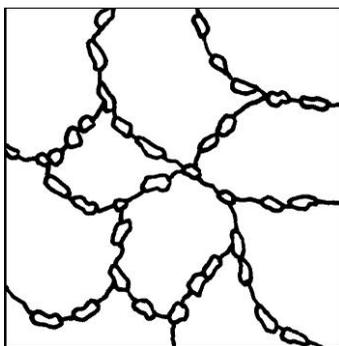


Рисунок 13.- Схема микроструктуры сплава марки МЛ5 в литом состоянии,  $\alpha$ -фаза и  $\gamma$ -фаза ( $Mg_4Al_3$ ).  $\times 600$

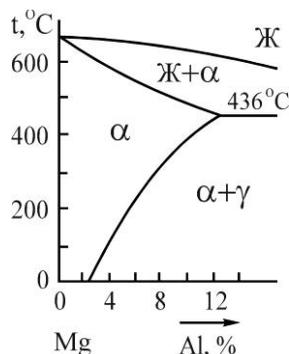


Рисунок 14.- Фрагмент диаграммы состояния системы магний - алюминий

Микроструктура сплава марки МЛ5 (см. рисунок 13) состоит из светлых зерен  $\alpha$ -твердого раствора алюминия в магнии и



## Физическое и прикладное материаловедение

более темных включений  $\gamma$ -фазы (соединения  $Mg_4Al_3$ ), располагающихся по границам зерен  $\alpha$ -фазы.

### 2.4. Микроструктура сплавов на основе олова

Микроструктура сплавов на основе олова в равновесном состоянии также может быть определена с помощью соответствующих диаграмм состояния, например, оловянистого баббита марки Б83 - с помощью тройной диаграммы состояния системы Sn-Sb-Cu. Микроструктура этого сплава в литом состоянии состоит из тройной эвтектики в виде основного темного поля  $\alpha$ -твердого раствора сурьмы в олове и равномерно распределенных светлых мелких включений соединения SnSb и  $Cu_6Sn_5$ , светлых крупных кристаллов соединения SnSb и светлых мелких кристаллов соединения  $Cu_6Sn_5$  в виде игл или звездочек (рисунок 15).



Соединение  $Cu_6Sn_5$  кристаллизуется в первую очередь и равномерно распределяется в объеме жидкости, образуя своеобразную сетку, препятствующую ликвации по удельному весу легких кристаллов SnSb. При этом вся медь, находящаяся в сплаве, расходуется на образование соединения SnSb.

Рисунок 15ю- Схема микроструктуры баббита марки Б83 в литом состоянии. SnSb,  $Cu_6Sn_5$  и тройная эвтектика ( $\alpha+SnSb+Cu_6Sn_5$ ).  $\times 200$

Мягкая, пластичная основа в виде тройной эвтектики и твердые включения соединений SnSb и  $Cu_6Sn_5$  обеспечивают высокий уровень антифрикционных свойств и применяются для заливки подшипников газовых турбин, турбокомпрессоров, турбонасосов и др.

## 3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 3.1. Уясните цель работы.
- 3.2. Изучите классификацию, характеристику и особенности формирования структуры цветных сплавов в условиях равновесия.
- 3.3. Изучите микроструктуру цветных сплавов.
- 3.4. Изобразите схемы микроструктур изученных цветных сплавов.
- 3.5. Выполните микроструктурный анализ цветных сплавов.
- 3.6. Проследите, используя диаграмму, за формированием струк-



туры одного из сплавов при охлаждении из жидкого состояния.

3.7. Составьте отчет о работе.

#### **4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

- Цель работы.
- Классификация и краткая характеристика изученных сплавов.
- Схемы микроструктур цветных сплавов.
- Микроструктурный анализ цветных сплавов.
- Схемы вероятных микроструктур в процессе охлаждения из жидкого состояния одного из цветных сплавов.

#### **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

- 1. По какому принципу цветные сплавы делят на литейные и деформируемые?
- 2. Какие сплавы называются дуралюминами, какие - силуминами?
- 3. В чем заключается модифицирование силумина, какое изменение в структуре и свойствах оно вызывает?
- 4. Какие сплавы называются латунями, какие бронзами?
- 5. В чем различие по составу, структуре и свойствам однофазных и двухфазных латуней?
- 6. Каково влияние олова на структуру и свойства оловянистых бронз?
- 7. Какой состав, структуру и свойства имеет свинцовистая бронза марки БрСЗО?
- 8. Какие легирующие элементы используются в магниевых сплавах?
- 9. Каковы требования, предъявляемые к антифрикционным материалам? Какова структура баббита марки Б83?
- 10. Каковы принципы маркировки цветных сплавов?

#### **РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гуляев А. П. Металловедение.- М.: Металлургия, 1986. 544 с.
2. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов.- М.: Металлургия, 1984. 360 с.
3. Материаловедение/ Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. и др.- М.: Машиностроение, 1986. 384 с.
4. Геллер Ю.А., Рахштадт А. Г. Материаловедение.- М.: Металлургия, 1986. 456 с.



## Лабораторная работа №4 ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПЛАСТМАСС

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучение состава, назначения составляющих, классификации и использования пластмасс, а также их основных свойств.

### 1. СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ПЛАСТМАСС

**Пластмассами** называют искусственно изготовленные материалы, состоящие из высокополимерных органических соединений и других веществ, обладающих способностью принимать под действием температуры и давления заданную форму и сохранять ее после затвердевания. Высокополимерными называют соединения, молекулы которых состоят из связанных друг с другом многократно повторяющихся частиц – элементарных звеньев.

В состав сложных пластмасс входят различные вещества, которые по выполняемым функциям называют наполнителями, пластификаторами, красителями, смазывающими веществами, стабилизаторами.

**Наполнители** – вещества, вводимые в полимерные материалы для придания требуемых свойств. Количество их составляет 40-70%. В зависимости от формы частиц наполнители подразделяются на порошковые (древесная и кварцевая мука, порошки металлов, слюда), волокнистые (асбестовое, стеклянное, хлопчатобумажное и синтетическое волокно), листовые, армирующие (бумага, хлопчатобумажные, стеклянные ткани, проволочные сетки, металлическая фольга).

**Пластификаторы** придают твердому полимеру пластичность и упругость. В качестве пластификатора применяют камфору, крезилфосфат, дибутилфосфат и др.

**Красители**, вводимые в количестве 1,0-1,5%, окрашивают пластмассы в требуемый цвет (охра, окись хрома и др.).

**Смазывающие вещества** предотвращают прилипание прессуемых изделий к пресс-формам (олеиновая кислота, стеарат кальция и др.).

**Стабилизаторы** предотвращают распад полимера под действием света или повышенной температуры. Например, для защиты полиэтилена от действия ультрафиолетовых лучей в него вводят сажу.

Все пластмассы органического происхождения разделяются по **химической природе полимера** на 4 класса.



## Физическое и прикладное материаловедение

Класс А – пластмассы на основе полимеров, получаемых цепной полимеризацией. Полимеризация – реакция, при которой образование полимера происходит путем соединения одинаковых молекул с прибавлением концевых групп без выделения каких-либо побочных продуктов реакции. Образующийся таким путем полимер имеет молекулярный вес, равный сумме молекулярных весов вступивших в реакцию молекул. К классу А относятся: полиэтилен, полихлорвинил, полистирол, фторопласт, акрилопласты.

Класс Б – пластмассы на основе высокополимеров, получаемых поликонденсацией. Поликонденсация – реакция образования высокомолекулярных веществ, сопровождаемая выделением побочных продуктов (вода, аммиак и др.). В результате получают макромолекулы линейного и пространственного строения. К классу Б относятся: фенопласты, наволочные, резольные и эпоксидные смолы, капрон, нейлон и др.

Класс В – пластмассы на основе химически модифицированных природных полимеров. При модификации природных полимеров различными химическими воздействиями сохраняется скелет молекулы исходного вещества. К классу В относятся: целлюлоза, нитроцеллюлоза, ацетилцеллюлоза, этрол и др.

Класс Г – пластмассы на основе природных и нефтяных асфальтовых смол, получаемых при сухой перегонке различных органических веществ. К этому классу относятся битумоасфальтовые пластмассы.

В зависимости от **поведения пластмасс при переработке** в изделия их разделяют на термопластичные и термореактивные.

Термопластичные материалы (термопласты) под действием температуры и давления переходят в пластичное состояние, не претерпевая существенных химических изменений. Их превращения обратимы. При действии температуры и давления они повторно переходят в пластичное состояние и могут быть многократно переформованы. К числу наиболее распространенных термопластов относятся: полиэтилен, полипропилен, полихлорвинил, оргстекло, фторопласт, полистирол, капрон и др.

Термореактивные материалы (реактопласты) под действием температуры и давления также переходят в пластичное состояние, но при этом претерпевают существенные химические изменения. Их превращения необратимы. При повторном действии температуры и давления они не переходят в пластичное состояние и не могут быть повторно переформованы. К числу реак-



топластов относятся: фенопласты, аминопласты, эпоксидные смолы, текстолит, гетинакс и др.

Различные пластмассы обладают различными **свойствами**. К положительным свойствам пластмасс относятся следующие:

1. Низкий удельный вес. Пластмассы в среднем в 2 раза легче алюминиевых сплавов. Удельный вес в значительной степени определяется химическим составом полимера и его структурой. Наиболее легкими являются полимеры с линейными макромолекулами (около  $0,9 \text{ г/см}^3$ ). Увеличение удельного веса полимера вызывают галогены (фтор, хлор, иод). Кристаллические полимеры несколько тяжелее аморфных. Значительное влияние на удельный вес пластмасс оказывают наполнители и пластификаторы.

2. Относительно высокие прочностные свойства. Отдельные виды пластмасс прочнее дерева, керамики, цветных металлов и сплавов. Почти все виды пластмасс обладают достаточно высокими значениями ударной вязкости. Механические свойства обусловлены структурными особенностями материала и зависят от степени полимеризации и взаимного расположения молекул полимера. При увеличении числа молекул полимера выше определенного значения его механические свойства улучшаются, так как разрыв будет происходить по главной валентной связи, имеющей постоянное значение. Так как величина межмолекулярных сил в большой степени зависит от расстояния между молекулами, к увеличению прочности приводит ориентация линейных молекул, позволяющая сблизить соседние цепи. Механические свойства полимерных материалов в значительной степени зависят от внешних факторов: температуры, влажности, ультрафиолетового облучения, а также наличия паров растворителя.

3. Высокие диэлектрические свойства. Пластмассы являются одним из лучших электроизоляционных материалов, используемых в электрорадиотехнике.

4. Высокая стойкость к агрессивным средам. Особенно высокой химической стойкостью обладает фторопласт-4.

5. Относительно высокая теплостойкость, составляющая  $70\text{--}300^\circ\text{C}$ .

6. Хорошие клеящие свойства. Используются для изготовления клеев, лакокрасочных покрытий, замазок.

7. Хороший товарный вид.

8. Некоторые виды пластмасс прозрачны, пропускают ультрафиолетовые лучи, обладают звукоизоляцией, поглощают и гасят вибрации и т.д.



## Физическое и прикладное материаловедение

К отрицательным свойствам пластмасс можно отнести:

1. Старение (ухудшение со временем свойств и товарного вида).
2. Хладотекучесть (деформация при действии постоянной нагрузки даже при комнатной температуре).

Основные свойства некоторых пластмасс представлены в таблице.

Пластмассы нашли широкое применение в промышленности и быту. Полиэтилен используется для изоляции проводов, кабелей, производства деталей радиоаппаратуры, труб, пленок, покрытий металлов и т.д. Из винипласта изготавливают листы, пленки, трубы, стержни, отличающиеся высокой химической стойкостью. Фторопласт применяется для изготовления электро- и радиотехнических деталей, в химическом машиностроении, для покрытия металлов.

Основные свойства пластмасс

Наименование	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности при растяжении, МПа	Твердость по Бриггеллю, МПа	Ударная вязкость Н/мм <sup>3/2</sup>	Относительное удлинение, %	Область применения
<b>Термопластичные пластмассы</b>						
Полиэтилен(ПЭ 150, ПЭ-300)	0,92	1000-1600	430-520	160	150-500	Изоляционные детали
Фторопласт-4	2,2-2,4	1600	30-40	1000	250-500	Детали уплотнений
Полиамид П-68А	1,12-1,15	4000-6000	44,5	1000-2500	100-350	Антифрикционный материал



Термореактивные пластмассы						
Текстолит	1,3-1,4	5000-12000	250-450	90-110	0,38	Антифрикционный материал
Гетинакс	1,3-1,4	7500-20000	250-400	130-400	1,8-2,0	Детали радиоаппаратуры
Аминопласт	1,5	4000-6000	350-550	50-60	-	Изделия ширпотреба

Полиамидные смолы (капрон, нейлон) используют как ответственные детали машин и приборов. Эти материалы нашли широкое применение как синтетические волокна. Органическое стекло используется при изготовлении линз и для остекления. Пластмассы являются хорошими заменителями черных, цветных и благородных металлов и сплавов.

## 2. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ПЛАСТМАСС

### 1. Испытания на твердость

Твердость пластмасс определяют по методу Бринелля - вдавливанием стального шарика диаметром 5,0 мм в испытуемый материал под действием выбранной нагрузки в течение определенного времени. Испытания проводятся на образцах толщиной не менее 5 мм. Твердость определяется по таблицам в зависимости от диаметра отпечатка шарика на поверхности пластмассы.

### 2. Испытания на растяжение

При испытании используются образцы из листовых материалов: полиэтилена, текстолита, гетинакса. Кроме того, для сравнения испытываются образцы стальные, медные, алюминиевые.

В результате определяют предел прочности при растяжении  $\sigma_B$ , удельную прочность  $k_p$  при растяжении и относительное удлинение  $\delta$ .

Величину предела прочности при растяжении определяют



по формуле:

$$\sigma_B = \frac{P}{F},$$

где  $P$  – величина разрывного усилия, Н;  $F$  – площадь поперечного сечения рабочей части образца до испытаний,  $\text{м}^2$ .

Величина удельной прочности при растяжении определяется по формуле:

$$k_p = \frac{\sigma_B}{\gamma},$$

где  $\gamma$  – удельный вес испытываемого материала,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Величину относительного удлинения  $\delta$  определяют по формуле:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%,$$

где  $l_1$  – длина образца после разрыва, м;  $l_0$  – расчетная длина образца до разрыва, м.

### 3. Испытания на ударную вязкость

Определение ударной вязкости проводят на образцах без надреза. Для испытаний используются образцы из древесностружечных плит (ДСП), текстолита, гетинакса. Испытания осуществляются на копке маятникового типа.

Величину ударной вязкости  $\alpha$  определяют по формуле:

$$\alpha = \frac{A}{b \cdot h},$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая на разрушение образца;  $b$  и  $h$  – соответственно ширина и толщина образца до испытаний.

## 3 КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИЗДЕЛИЯМ ИЗ ПЛАСТМАСС

Конструктивные особенности изделий из пластмасс обусловлены их свойствами и способами получения. При проектировании деталей (особенно изготовляемых литьем под давлением и прессованием) необходимо учитывать следующие основные особенности.

Процесс изготовления изделий сопровождается большой усадкой. Поэтому в конструкциях не допускается значительной разностенности, которая вызывает коробление деталей и образо-



вание трещин.

Для повышения жесткости в конструкции деталей необходимо вводить ребра жесткости. Для малогабаритных деталей роль ребра жесткости могут выполнять выступы или впадины.

Если возможно по конструктивным соображениям, детали необходимо выполнять с большой конусностью. Сквозные отверстия лучше располагать не в сплошных массивах, а в специальных бобышках с тонкими стенками, что снижает усадку и усилие обхвата стержней пресс-форм.

В конструкциях деталей не следует делать острых углов в местах сопряжения поверхностей, так как это может привести к образованию трещин.

Для облегчения извлечения детали из пресс-формы на наружной и внутренних формообразующих поверхностях необходимо предусматривать технологические уклоны.

#### **4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Указать цель работы.
2. Изучить и описать состав и основные разновидности пластмасс.
3. Описать положительные и отрицательные свойства пластмасс, указать область их применения.
4. Провести эксперименты по определению основных свойств пластмасс.
5. Изучить и описать конструкторско-технологические требования к изделиям из пластмасс.

#### **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Каков состав пластмасс? Какие функции выполняют входящие в них вещества?
2. На какие классы делятся пластмассы?
3. В чем основное различие термопластичных и терморезистивных пластмасс?
4. Какими положительными и отрицательными свойствами обладают пластмассы?
5. Как проводят испытания пластмасс на твердость?
6. В чем сущность испытаний пластмасс на растяжение? Какие основные свойства при этом определяются?
7. Как определяется ударная вязкость пластмасс?
8. Какие конструктивно-технологические требования предъявляются к изделиям из пластмасс?



## Лабораторная работа №5 ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ СТЕКЛА

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** ознакомиться с некоторыми методами контроля свойств стекла.

### 1. СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА СТЕКЛА

Стекло, являясь разновидностью аморфных веществ, представляет собой прозрачный материал, получаемый плавлением и последующим охлаждением различных комбинаций окислов, которые по назначению подразделяются на стеклообразующие, модифицирующие и промежуточные.

К **стеклообразующим** окислам относятся окислы кремния, бора, фосфора, германия и мышьяка. К **модифицирующим** окислам, которые используются для изменения физико-химических свойств стекла, относятся окислы щелочных и щелочно-земельных металлов. К **промежуточным** окислам относятся окислы алюминия, свинца, железа, титана, бериллия, которые могут замещать некоторую часть стеклообразующих окислов в структурном каркасе стекла и обуславливают изменение свойств стекла в нужном направлении.

Стеклообразующий каркас стекол представляет собой непрерывную беспорядочную пространственную трехмерную сетку, в узлах которой расположены ионы, атомы или группировки атомов (рисунок).

Химический состав стекол можно изменять в широких пределах, поэтому и свойства стекла могут быть достаточно различными (таблица).

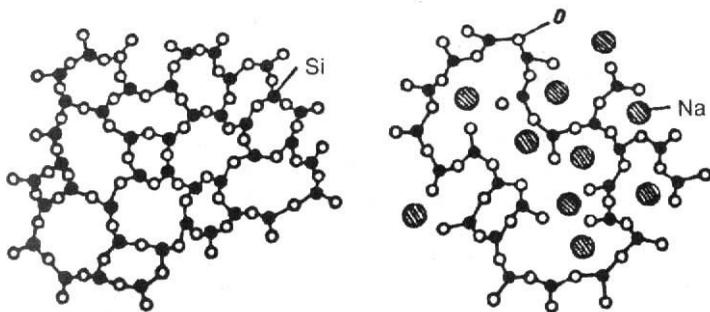


Схема структурной сетки стекла: а – кварцевого, б – натриево-силикатного



Механические свойства стекла можно существенно повысить различными методами упрочнения поверхностного слоя стекла: термической, химической или термохимической обработкой.

Свойства некоторых промышленных стекол и ситалла

Стекло	Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\sigma$ , МПа при			Температура размягчения, °С	Термостойкость, °С
		сжатию	растяжении	изгибе		
Листовое силикатное	2,0-2,5	600-700	30-70	50-100	-	40-80
«Мазда»	2,6	-	-	-	806	185
МКР-1	2,3	78	-	45-50	650	180
Кварцевое	2,0-2,3	350-650	40-60	45-100	1200	1000
енност екло	0,18-0,8	150-250	50-100	50-100	300-400	110-170
Ситалл	2,4-2,7	1000-2000	110-160	70-350	1200-1350	—

Термический метод упрочнения заключается в закалке стекла. Сущность закалки стекла заключается в нагреве его до температуры 620-650°С, выдержке при этой температуре и в быстром, равномерном охлаждении с обеих сторон. При такой обработке в поверхностных слоях стекла возникают сжимающие остаточные напряжения, благодаря чему стойкость стекла к статическим нагрузкам возрастает в 4-6 раз, прочность на удар в 5-7 раз, а термическая стойкость в 2-3 раза.

Химический метод упрочнения заключается в удалении дефектного с микротрещинами поверхностного слоя стекла методом химического травления. Наибольший эффект упрочнения достигается в результате комбинированных методов упрочнения.

## 2. РАЗНОВИДНОСТИ СТЕКЛА

Кварцевое стекло состоит практически из чистого кремне-



## Физическое и прикладное материаловедение

зема (99,5%)  $\text{SiO}_2$  и отличается высокими показателями термической и химической стойкости. Из него изготавливают химически стойкую посуду, чехлы для термопар, изоляторы, электровакуумные приборы, работающие при повышенных температурах.

Безосколочное стекло (триплекс) – это комбинированное стекло, состоящее из двух или нескольких слоев обычного промышленного стекла, склеенных с прозрачным эластичным и упругим промежуточным слоем прозрачного органического полимера. Для получения высокопрочных и безопасных в работе безосколочных стекол весьма эффективно склеивание нескольких слоев стекол, предварительно закаленных. Безосколочные стекла применяются для остекления автомашин, самолетов, для изготовления прозрачных экранов к металлорежущим станкам, а также для изготовления приборов, работающих при повышенных температурах и давлениях.

Пеностекло получают вспениванием расплавленного стекла при 700-900°C различными газотворными веществами (мел, уголь, кокс). Пеностекло имеет малую плотность, его используют как звуко- и теплоизоляционный материал. Кроме того, пеностекло используют для изготовления фильтров, от которых требуется высокая химическая стойкость.

Стекловолоконное волокно получают из расплавленного стекла вытягиванием стекломассы через фильтры или другими способами. Стекловолоконное волокно отличается высокими прочностными свойствами, стойкостью к агрессивным средам и высокой теплостойкостью. Ткани из стекловолокна используют для изготовления стеклотекстолитов и т.д.

Стеклокристаллические материалы – ситаллы отличаются от стекла минералогическим составом и микрокристаллическим строением. Процесс получения изделий из ситаллов осуществляется следующим образом. Из расплавленного стекла определенного состава, в котором находятся катализаторы (для создания центров кристаллизации) получают изделия, которые после охлаждения находятся в стеклообразном состоянии. Повторный нагрев до температуры стеклования (400-600°C) вызывает образование в стекле зародышей кристаллизации. На них при нагреве происходит выделение фаз стекла в кристаллическом состоянии. Ситаллы имеют высокую твердость, предел прочности при изгибе (150-500 МПа), высокую термостойкость (700-800°C) и химическую стойкость. Из ситаллов изготавливают подшипники для работы без смазки при температуре 540°C, поршни и цилиндры двигателей внутреннего сгорания и др.



### 3. ОБРАБОТКА И СОЕДИНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТЕКЛА

При необходимости силикатные стекла можно подвергать механической обработке (разрезке, точению, сверлению, фрезерованию) с применением абразивного и алмазного инструмента. Перспективными являются лазерная и ультразвуковая обработка.

Все силикатные стекла можно соединять неразъемно клеевым способом. Для склеивания и приклеивания силикатных материалов к другим материалам (металлу, дереву, пластмассам) применяют цементы (портланд-цемент) и различные вязущие (клеевые) композиции на основе синтетических смол.

Неразъемное соединение стекол можно осуществлять сваркой и пайкой. Сварку осуществляют газовой горелкой с применением присадочного прутка из стекла, который, сплавляясь в зоне сварки, дает прочный шов, а пайку – путем нарева стекол до температуры, при которой вязкость снижается, и механического сдавливания. В результате происходит взаимное смешивание и в процессе охлаждения возникает прочное соединение.

Возможны и разъемные соединения деталей из силикатных материалов – резьбами, выполняемыми при формовании изделий, или с помощью фланцев и т.д.

### 4. КОНТРОЛЬ СВОЙСТВ СТЕКЛА

Плотность силикатных стекол определяют несколькими методами. Наиболее распространенным является метод гидростатического взвешивания. Для этого образец стекла 5-25 г взвешивают на весах в воздухе и в дистиллированной воде. Плотность стекла вычисляют по формуле:

$$d = \frac{m_1 - m_2}{(m_1 - m_2) - (m_3 - m_4)} (\delta - 0,0012) + 0,0012 \quad (1)$$

где  $m_1, m_3$  – вес образца с проволокой соответственно в воздухе и

воде, г;  $m_2, m_4$  – вес проволоки соответственно в воздухе и воде, г;

$\delta$  – плотность воздуха при комнатной температуре. г/см<sup>3</sup>

Прочность стекла зависит от состава, температуры, состояния поверхности, размеров, условий испытаний, наличия дефектов и т.д. Значительное распространение получил контроль микропрочности путем вдавливания алмазной пирамиды прибора



ПМТ-3. Микропрочность вычисляется по формуле:

$$H_R = 6720 \frac{P}{4d^2 + l^2}, \quad (2)$$

где  $P$  – нагрузка при вдавливании, гс;  $d$  – длина диагонали отпечатка алмазной пирамиды, мкм;  $l$  – длина диагональной трещины, мкм.

(Трещины проявляются при травлении в слабом растворе плавиковой кислоты).

Существуют различные виды твердости стекла: стеклометрическая, вдавливанием, абразивная и т.д.

Критерием стеклометрической твердости служит ширина царапины, сделанной алмазной пирамидой под нагрузкой от 0,15 до 5,0 гс.

Критерием твердости вдавливанием (микротвердости) служит размер отпечатков, получаемых на поверхности стекла при вдавлении алмазной пирамиды с нагрузкой от 50 до 100 гс.

Продолжительность опускания и соприкосновения алмазной пирамиды с образцом должна быть одинакова во всех измерениях.

Микротвердость определяют прибором ПМТ-3, а численное ее значение находят по формуле:

$$H = \frac{1854P}{d^2}, \quad (3)$$

где  $P$  – нагрузка на алмазную пирамиду, кгс;  $d$  – длина диагонали отпечатка (обычно не более 10 мкм).

Абразивная твердость измеряется объемом стекла, снятым данным абразивом с единицы поверхности стекла за единицу времени при определенном давлении и скорости шлифования.

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определить плотность стекла.

Подвесив образец стекла к весам тонкой проволокой (0,05-0,01 мм) взвесить его на воздухе и в дистиллированной воде, вычислить плотность по формуле (1).

2. Определить объемный вес образца из пеностекла путем взвешивания на весах и определения объема.

Численное значение объемного веса вычислить по формуле:



$$\gamma = \frac{G}{V}$$

3. Определить микропрочность стекла путем вдавливания алмазной пирамиды прибора ПМТ-3 по формуле (2).

4. Определить микротвердость по формуле (3).

## 6. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Указать цель работы.

2. Изучить и описать основные разновидности стекол.

3. Изучить и описать основные методы упрочнения стекла. 4. Изучить и описать основные методы контроля свойств стекла.

5. Результаты опытов занести в таблицу

Основные свойства стекла					
Марка стекла	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес, кг/м <sup>3</sup>	микропрочность, МПа	стеклометрическая твердость, мкм	микротвердость, МПа

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как получают стекло и каков его химический состав?

2. Какое строение имеет стекло?

3. Какие методы упрочнения стекла Вы знаете?

4. Какие существуют разновидности стекол и какое практическое применение они находят?

5. Какие существуют способы соединения деталей из стекла?

6. Какие основные свойства стекла Вы знаете? Какими методами свойства стекла контролируются?



## Лабораторная работа №6

# ИЗУЧЕНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ И ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучить макроструктуру и особенности строения древесины, методы определения ее основных свойств.

### 1. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Древесина является универсальным материалом по разнообразию применения в технике, промышленности и в быту.

В машиностроении древесные материалы используются для изготовления шестерен, подшипников, амортизаторов и т.д. Особенно ценны эти материалы как вспомогательные при изготовлении модельной оснастки для производства модельных отливок.

Древесина – природный материал растительного происхождения. Она состоит из 43-54% целлюлозы ( $C_6H_{10}O_5$ ), лигнина, остальное - низкомолекулярные углеводороды и другие компоненты.

Достоинствами древесины, как конструкционного материала являются: малый объемный вес; достаточно высокая удельная прочность; хорошая сопротивляемость ударным и вибрационным нагрузкам; малая теплопроводность; малый коэффициент температурного расширения (в 2-3 раза меньше, чем у стали); высокая стойкость к ряду кислот, солей, масел. Древесина обладает хорошими технологическими свойствами: легко обрабатывается, допускает возможность соединения деталей деревянных конструкций склеиванием, гвоздями, шурупами.

Недостатками древесины являются: гигроскопичность, изменяющая размеры, форму и прочность деревянных деталей; склонность к загниванию; отсутствие огнестойкости.

Для защиты древесины от загнивания деревянные элементы конструкции изолируют от контакта с водой лакокрасочными, пластмассовыми покрытиями. Из химических способов защиты применяются антисептирование деревянных изделий путем пропитки растворами солей  $NaF$ ,  $ZnCl_2$ ,  $CuSO_4$  и др.

Для снижения воспламеняемости производится пропитка древесины антипиренами, которыми являются алюминиевые соли, соли фосфорной или борной кислот. Применяются также огнезащитные краски и лаки.

Древесина обладает низким значением модуля упругости

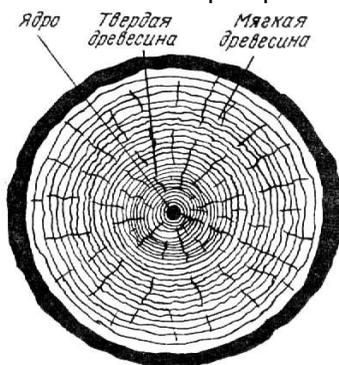


и анизотропией свойств из-за волокнистости строения.

Знание особенностей строения древесины позволяет существенно снизить природные недостатки ее, как конструкционного материала.

## 2. МАКРОСТРУКТУРА ДРЕВЕСИНЫ

Так как древесина является волокнистым материалом, то изучение ее строения и свойств проводят по трем разрезам: торцевому (поперечному), перпендикулярному к волокнам, радиальному, проходящем через ось ствола, тангенциальному, идущему вдоль ствола на некотором расстоянии от оси.



Каждое дерево состоит из трех основных частей: корня, ствола и кроны. Наибольшее практическое значение для промышленности и строительства имеет ствол, дающий от 50 до 90% древесины от всего объема дерева.

Рисунок 1.- Сечение ствола дерева

Макростроение древесины хорошо видно на поперечном разрезе ствола (рисунок 1). Кора состоит из наружного пробкового слоя и внутреннего лубового, содержащего мелкие каналы, по которым питательные вещества от кроны идут вниз. Камбий - нежный и сочный слой. Состоит он из живых клеток. В результате развития клеток камбия в древесине образуется годичный слой или кольцо. Годичное кольцо состоит из внутреннего слоя, которое образуется весной и называется ранней или весенней древесиной, и наружного слоя, который формируется к концу лета и называется поздней или летней древесиной. Заболонь - светлое кольцо, охватывающее внутреннюю часть ствола за камбием, представляет собой более молодую древесину, а ядро - более старую. Сердцевина в механическом отношении слабая ткань, помещается она в геометрическом центре поперечного сечения ствола. От нее по радиусам к коре идут сердцевинные лучи (волокна), служащие проводником древесных соков внутри ствола. Кроме поперечных волокон (сердцевинных лучей) имеются продольные волокна, составляющие основную массу древесины. Они



состоят из тонкостенных механически слабых клеток, количество их составляет 4-30% объема ствола дерева. Хвойные породы древесины имеют также вертикальные и горизонтальные смоляные ходы.

У некоторых пород (дуб, ясень) имеются крупные сосуды, сосредоточенные в весенней зоне годичного кольца, и мелкие сосуды, расположенные в летней зоне кольца. Такие породы называются кольцесосудистыми. Характерные признаки их приведены в таблице 1. Те породы, в которых сосуды расположены равномерно по кольцу (береза, липа), называются рассеянососудистыми. Характерные признаки хвойных пород приведены в таблице 2. Строение колец, содержание летней древесины в них обуславливают механическую прочность как хвойных, так и лиственных пород.

### **3. ПОРОКИ ДРЕВЕСИНЫ**

К важнейшим порокам древесины относятся (рисунок 2):

1. Сучки, которые вызывают резкое изменение направления волокон, благодаря чему прочность древесины при растяжении, изгибе резко падает. Сучки бывают следующих видов: сшивной твердый - годичные слои его составляют одно целое с окружающей древесиной; здоровый - без признаков гнили и изменения окраски; роговой - древесина сучка здоровая, но обильно пропитана смолой, по цвету темнее окружающей древесины; несросшиеся - образуют в древесине отверстие или гнилой участок; выпадающий - древесина сучка твердая, но с окружающей основой не связана; рыхлый.

2. Трещины, которые могут быть внутренние, радиальные –метки; кольцевые трещины по годичному слою - отлуп; наружные продольные трещины на стволе, возникающие при резком изменении температуры - морозобоины; в срубленной древесине трещины возникают от усушки и имеют вид наружных трещин различной длины.

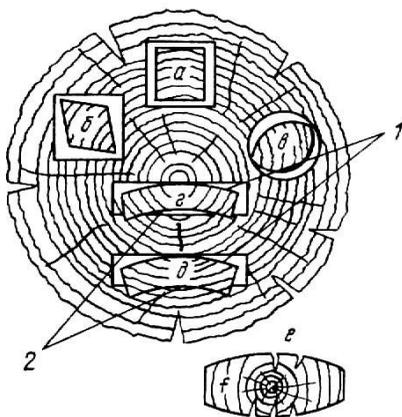


Рисунок 2.- Искажения древесины и трещины, возникающие в результате неоднородного скручивания в разных направлениях во время обработки дерева:

а, б, в - деформация в продольном сечении; г - коробление доски, вырезанной из ядра дерева; д - деформация дерева из заболонной части; е - образование трещин; 1 - «правая» сторона доски (от стороны сердцевины); 2 - «левая» сторона доски (от внешней стороны пня)

Трещины мало влияют на прочность при растяжении вдоль волокон. Они снижают на 5-10% прочность на сжатие и особенно резко снижают прочность при скалывании вдоль волокон.

3. Косослой, который характеризуется спиральным расположением волокон в отношении оси ствола. Так как в пиломатериале косослой вызывает перерезывание волокон, то снижается прочность изделия. Свилеватость - волнообразное расположение волокон в древесине.

4. Крень - ненормальное утолщениелетней древесины годичного слоя со значительным повышением ее твердости на более узкой стороне и смещением сердцевины.

5. Паразитные пороки. К ним относятся грибные (микробиологические). Под грибковым поражением древесина разрушается, превращаясь в труху. Возможны повреждения насекомыми (червоточина). Наличие этого порока понижает сортность древесины.

Таблица 1. Признаки лиственных кольце-сосудистых пород  
Общий признак: расположение сосудов в ранней древесине годичного слоя в виде кольца

Цвет ядра	Вес, плотность	Характеристика заболони	Макроскопическое строение		Порода
			торцовый разрез	радиальный разрез	
1	2	3	4	5	6



От светлого до темно-бурого	Тяжелая, твердая	Узкая, светло-бурого цвета, отличается от ядра	Годичные слои хорошо различаются. Поздняя древесина годичного слоя плотного строения. Сосуды идут радиальными рядами. Многочисленны сердцевинные лучи, хорошо различимые в виде темных, матовых или светлых полос.	Широкие сосуды видны в виде бороздок или каналов. Сердцевинные лучи имеют вид вертикальных полос. На границе годичных слоев сердцевинные лучи пересекаются темными линиями.	Дуб
Светло-бурый	Тяжелая, твердая	Широкая, светлая, не резко отличается от ядра	Кольца крупных сосудов хорошо видны, размер сосудов по направлению к поздней части сердцевины уменьшается. Поздняя часть по цвету темнее ранней. Сердцевинные лучи очень узкие, тонкие и едва заметные.	Границы годичных слоев хорошо заметны. Сердцевинные лучи не видны.	Ясень

Признаки лиственных рассеянно-сосудистых пород  
Общий признак: сосуды крупные и мелкие, распределены по всему годовому слою равномерно

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---



Белый, с розовым или красноватым оттенком	Твердая и довольно тяжелая	Годичные слои неотчетливы, но хорошо обнаруживаются, если смочить водой	Сердцевинные лучи невооруженным глазом не видны	Годичные слои различаются плохо. Сердцевинные лучи обнаруживаются в строго радиальном разрезе в виде темных пятен и реже в виде полос темно-бурого цвета	Береза
От светлого до светло-красного	Легкая и мягкая		Границы годичных слоев слабо извилисты. Сердцевинные лучи многочисленные и тонкие, различаются слабо. Имеются ложные широкие сердцевинные лучи в виде матовых толстых линий.	Границы годичных слоев заметны. Сердцевинные лучи имеют вид точек или линий бурого цвета.	Ольха

Таблица 2. Признаки хвойных пород дерева  
Общий признак: сосудов нет, годичные слои ясно выражены

Цвет забора-	Макроскопическое строение	Порода
--------------	---------------------------	--------



лонной части древесины или цвет древесины	Торцовый разрез	Радиальный разрез	
1	2	3	4
Желтовато-белый	Годичные слои хорошо различаются. Ранняя древесина годичных слоев светлого оттенка. Сердцевинные лучи не заметны, смоляные ходы в поздней части древесины годичного слоя хорошо видны в виде светлых точек.	Годичные слои резко различаются друг от друга. Сердцевинные лучи не заметны. Смоляные ходы хорошо видны в поздней части древесины в виде беловато-матовых черточек.	Сосна
Светлый	Годичные слои резко выделяются. Ранняя древесина более светлого оттенка и резко переходит в более позднюю, которая имеет темную окраску. Смоляные ходы обнаруживаются с трудом. Сердцевинные лучи не видны.	Годичные слои резко выделены. Мелкие многочисленные смоляные ходы хорошо видны.	Лиственница



Белый, со слабым желтовато-бурым оттенком	Годичные слои хорошо различаются. Ранняя древесина развита и имеет рыхлое строение и более светлый оттенок. Поздняя имеет вид узкой полосы плотного строения. Смоляные ходы видны в виде мелких точек. Сердцевинные лучи не заметны.	Годичные слои выделяются не особенно резко. Смоляные ходы при отражении света заметны в виде коротких матово-белых черточек.	Ель
Белый, со слабым желтовато-бурым оттенком	Годичные слои выделяются слабо. Смоляных ходов нет.	Годичные слои хорошо заметны. Смоляных ходов нет.	Пихта
Желтовато-бурый, мало отличается от ядра	Годичные слои хорошо различаются. Сердцевинные лучи не видны. Смоляные ходы в летней части выделяются беловатыми точками.	Годичные слои резко выделены. Крупные смоляные ходы хорошо видны.	Кедр

#### 4. ДРЕВЕСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Шпон - широкая, тонкая (0,55-1,5 мм) ровная стружка древесины, получаемая лущением или строганием. Шпон является полуфабрикатом для изготовления фанеры, древесных слоистых пластиков (ДСП). Шпон из кедра и ольхи используется для сепараторов свинцовых аккумуляторов.



Фанера - листовый материал, получаемый склейкой листов шпона. Листы шпона в смежных слоях имеют взаимно перпендикулярное направление волокон. Толщина фанеры 1-12 мм. Водостойкость фанеры зависит от применяемого для соединения шпона клея: фанера ФСФ на фенолформальдегидном клее обладает повышенной водостойкостью; фанера ФК на карбамидном и ФБА на альбуминоказеиновом клеях обладают средней водостойкостью; фанера ФБ на белковых клеях - ограниченной водостойкостью. Прессованная древесина получается прессованием в нагретых пресс-формах деревянных заготовок. Прочность прессовок возрастает при растяжении до двух раз, при изгибе и сжатии до трех раз. Ударная вязкость 60-80 кгс/см/см<sup>2</sup>. Такая древесина используется как заменитель металла, из нее изготавливаются сегменты зубчатых передач, подшипники, втулки, челноки и т.д.

Древесно-стружечные плиты изготавливают горячим прессованием стружек со связующими смолами (фенолформальдегидными и др.). Плиты бывают однослойные, трехслойные (в середине обычная стружка, на поверхности - специальная, тонкая), облицованные шпоном, фанерой, картоном, пластиком. Древесно-стружечные, а также опилочные плиты - пример рационального использования отходов древесины, что дает народному хозяйству большой экономический эффект. Такие плиты используются как тепло- и звукоизоляционные в строительных конструкциях, при производстве мебели и т.д.

## 5. СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ

К физическим свойствам древесины относятся: цвет, текстура, влажность разбухания, линейная и объемная усушки, объемный вес, гигроскопичность, тепло-, звуко- и электропроводность.

Цвет древесины, определяемый дубильными веществами, смолами и продуктами их окисления, является важным свойством ее при определении древесных пород.

Текстура - это естественный рисунок, получаемый на продольном разрезе древесины вследствие перерезания ее волокон, годовых слоев и сердцевинных лучей. Это свойство используется при применении древесины в декоративных целях.

Влажность (W) древесины зависит от породы дерева и почвенно-климатических условий его произрастания. Определяется влажность по формуле:



$$W = \frac{G - G_0}{G_0} 100\% , \quad (1)$$

где  $G$  - вес влажного образца, г;  $G_0$  - вес образца в сухом состоянии (высушенного при  $100^\circ\text{C}$ ).

Мокрая древесина, долго находящаяся в воде, имеет  $W$  около 100%, свежесрубленная 50-100%, воздушно-сухая 10-20%, в комнатных условиях влажность древесины 7-10%. Для возможности сравнения все свойства древесины устанавливаются при стандартной влажности  $W=15\%$ .

Определение влажности производится на образцах древесины, взвешенных до и после высушивания при температуре  $100^\circ\text{C}$  в течение шести часов.

Линейная усушка ( $\gamma$ ) характеризует уменьшение размеров образца древесины вследствие удаления из нее влаги выражается в процентах по отношению к размеру образца после высушивания.

Линейная усушка определяется по формулам:

$$\gamma_T = \frac{a - a_1}{a_1} 100\% ; \gamma_P = \frac{b - b_1}{b_1} 100\% , \quad (2)$$

где  $\gamma_T$  и  $\gamma_P$  – линейная усушка в тангенциальном и радиальном направлениях, %;  $a, b, a_1, b_1$  – размеры образца по тангенциальному и радиальному направлениям до и после высушивания, мм.

Коэффициент линейной усушки ( $K$ ) представляет собой среднюю усушку при изменении влажности на 1% и определяется по формулам:

$$K_T = \frac{\gamma_T}{W} ; K_P = \frac{\gamma_P}{W} , \quad (3)$$

где  $W$  – влажность образца, % (не более 30%).

В силу анизотропности древесины усушка зависит от направления. Для различных пород дерева усушка в радиальном направлении  $K_P=0,09-0,31\%$ , усушка в тангенциальном направлении  $K_T=0,17-0,49\%$ .

Учет возможной усушки при хранении и эксплуатации древесины имеет важное значение, так как различная усушка в разных направлениях приводит к возникновению в древесине



внутренних напряжений, следствием чего является коробление и растрескивание древесины.

Для определения величины усушки образцы древесины измеряют по направлению линий, проведенных на торцевых поверхностях, с точностью до 0,01 мм. После высушивания образцов вновь проводят измерения их по тем же направлениям и в тех же местах, что и до высушивания.

Набухание древесины связано с поглощением воды. Иногда это явление положительно. Например, при эксплуатации в условиях повышенной влажности происходит уплотнение стыков и конструкция становится более плотной и прочной. Но часто это явление имеет отрицательные последствия. Например, набухание деревянных моделей ведет к искажению формы и изменению размеров отливок. Неравномерное набухание по сечению также может быть следствием коробления и растрескивания древесины.

Важной характеристикой древесины является объемный вес ( $\gamma$ ) - это вес единицы объема древесины в ее естественном виде. Он служит основным показателем качества и свойств древесины. Объемный вес образца при определенной влажности вычисляется по формуле:

$$\gamma = \frac{G}{V}, \quad (4)$$

где  $G$  – вес образца, г;  $V$  – объем образца, см<sup>3</sup>.

Для сравнения объемный вес древесины разной влажности приводят к стандартной (15%) влажности:

$$\gamma_{15} = \gamma [1 + 0,01 (1 - k_0) (15 - W)], \quad (5)$$

где  $W$  - влажность образца;  $k_0$  - коэффициент объемной усушки (%), определяемый по формуле:

$$k_0 = \frac{V_1 - V_2}{V_2 \cdot W} 100\%, \quad (6)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  - объем образца до и после высушивания, см<sup>3</sup>.

Средние значения показателей свойств древесины приведены в таблице 3.

Прочностью называется способность древесины сопротивляться действию внешних сил, стремящихся сжать, смять, растянуть, согнуть, сколоть или срезать ее. Прочность древесины зависит от времени нагружения: так  $\sigma_{изг}$  может изменяться от 100 МПа при кратковременном нагружении до 60 МПа при нагружении в течение 60 суток.



## Физическое и прикладное материаловедение

Прочность древесины при сжатии по результатам нагружения образца со скоростью 400 кгс/мин на прессе при фактической ее влажности определяется по формуле:

$$D_W = \frac{P_{\max}}{a \cdot b}, \quad (7)$$

где  $P_{\max}$  – разрушающая нагрузка, Н; а и b – размеры поперечного сечения образца, см.

Пересчет прочности древесины для стандартной ее влажности (15%) производят по формуле:

$$D_{15} = D_W [1 + \alpha (W - 15)], \quad (8)$$

где W – влажность образца;  $\alpha$  – поправочный коэффициент для сосны, бука, ясеня – 0,05; для ели, пихты, дуба – 0,04.

Твердость древесины определяет ее обрабатываемость и износостойкость. Торцовая твердость значительно выше радиальной. Для сравнения производят измерения твердости образцов древесины в радиальной и торцовой плоскостях.

Таблица 3. Основные свойства наиболее распространенных пород древесины при  $W'=15$ .

Порода дерева	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент усушки, %			Предел прочности, МПа при			Твердость, МПа		
		радиальный	тангенциальный	объемный	сжатии вдоль волокна	растяжении вдоль волокна	изгибе	радиальная	тангенциальная	торцовая
Хвойные породы										



Лиственница	0,68	0,21	0,40	0,62	55	123	98	28	28	40
Сосна	0,51	0,18	0,31	0,51	41	100	75	21	22	26
Ель	0,46	0,18	0,32	0,52	39	106	71	17	16	24
Лиственные породы										
Дуб	0,76	0,18	0,28	0,48	51	-	89	53	56	65
Береза	0,64	0,28	0,34	0,64	47	161	96	34	30	42
Липа	0,5	0,23	0,33	0,58	39	115	77	15	16	23

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить макростроение образцов древесины.
2. Зарисовать главный разрез ствола с указанием элементов строения.
3. Определить породу дерева по его макропризнакам, пользуясь таблицами 1-3.
4. Изучить наиболее распространенные пороки древесины.
5. Определить плотность, линейную и объемную усушку образцов древесины.

Для этого необходимо с помощью штангенциркуля измерить линейные размеры образцов и взвесить их с точностью до 1 мг до и после высушивания. Образцы высушиваются в печи в течение 6 часов при 100°C. По формулам определить численные значения нужных свойств древесины.

6. Вычислить объемный вес древесины.
7. Определить твердость образцов древесины разных пород в радиальной и торцовой плоскостях. Сравнить полученные результаты с табличными (см. таблицу 3).

## 7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Указать цель работы.
2. Зарисовать макроструктуры древесины с указанием элементов ее строения.
3. Записать результаты определения основных свойств древесины.

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие достоинства и недостатки имеет древесина как конструкционный материал?
2. Каково строение поперечного разреза ствола древесины? Чем оно отличается для лиственных и хвойных пород дерева?
3. Какие пороки имеет древесина?
4. Какие конструкционные материалы можно полу-



Физическое и прикладное материаловедение

чить переработкой древесины?

5. Как определяются основные свойства древесины? От каких внутренних и внешних факторов они зависят?



## Лабораторная работа №7 ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ РЕЗИНЫ

**Цель работы:** ознакомиться со строением резины и определить основные ее свойства,

### 1. СТРОЕНИЕ, СОСТАВ И СВОЙСТВА РЕЗИНЫ

Резины изготавливают из смесей различных материалов, основным из которых является каучук - линейный полимер с очень большим молекулярным весом  $(0,3-3) \times 10^6$ .

Каучуки бывают натуральными и синтетическими: первые получают из млечного сока деревьев (гевея), а также из каучуковых одуванчиков; вторые - из продуктов переработки нефти и спирта, называемых дивинилом, или из смеси дивинила и стирола. Наибольшее применение в производстве резин имеют каучук бутадиеновый (СКБ), бутилкаучук, бутадиен-нитрильный (СКН), бутадиен-стирольный (СКС), хлоропреновый, тиоколовый каучук, кремнийорганический и т.д.

При изготовлении резиновых изделий к каучуку прибавляют определенные смеси (ингредиенты). По назначению ингредиенты резиновых смесей разделяются на вулканизирующие вещества; вещества, ускоряющие вулканизацию (ускорители); усилители и наполнители - вещества, повышающие прочность резины; мягчители - вещества, облегчающие обработку резиновой смеси и повышающие мягкость готовых вулканизированных изделий; противостарители - вещества, предохраняющие резины от старения; красители.

**Вулканизация** - сложный физико-химический процесс, в результате которого происходит резкое изменение свойств каучука, теряется пластичность, появляется эластичность, увеличивается прочность и сопротивляемость растворителям (бензин и др.). В качестве основного вулканизирующего вещества применяют серу, а также селен и полухлористую серу..

Усилителями являются порошкообразные материалы - различные типы саж, каолин, цинковые белила, жженая магнезия и др.

Мягчители обеспечивают более равномерное распределение усилителей и наполнителей в смеси и тем самым облегчают обработку резиновых изделий. В качестве мягчителя используются вещества нефтяного происхождения - нефтебитумы, вазелин, петролатум, парафин, мазут и т.п.; продукты растительного



происхождения - сосновая смола, канифоль, эфиры и др.

В качестве противостарителей используются сложные органические вещества, а также кислородостойкие вещества, образующие на поверхности резины тонкую защитную пленку, предупреждающую проникновение кислорода в резину. К ним относятся парафин, воск.

**Использование резины.** В машиностроении применяемые резиновые детали делятся на 9 классов: уплотнительные, вибро- и звукоизолирующие, .противоударные, силовые, опоры скольжения, гибкие компенсационные прокладки, противовоздушные, фрикционные, несилловые и защитные.

Резины общего назначения изготавливают на основе неполярных каучуков - НК (натуральный каучук), СКБ, СКС, СКИ (синтетические каучуки). Резина на основе НК отличается высокой эластичностью, прочностью, водо- и газонепроницаемостью. Из резины общего назначения изготавливают ремни, рукава, транспортные ленты, изоляцию кабелей и др.

Резины специального назначения (маслостойкие, бензостойкие и др.) изготавливаются на основе полярного каучука (хлоропренового)- найрита. Данные о свойствах резин приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные свойства резины

Группа по назначению	Тип каучука	$\sigma_{в}$ , МПа	Удлинение, %	Температура, °С	
				рабочая	хрупкости
Общего назначения	НК СКБ	24-	до 700 до 600	80-130	-40
		34 13- 16		80-130	-42
Специальные	найрит	20- 26	до 750	100-130	-34
Бензо- и маслостойкие	СКН	22- 23	до 700	до 170	-48
Химически стойкие	тиокол бутил- каучук	3,2-	до 430 до 800	60	-40
		4,2 16- 24		-	-70
Теплостойкие	СКТ	3,5-8	360	250-316	-74

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ РЕЗИНЫ

Качество резиновых изделий проверяют различными



## Физическое и прикладное материаловедение

ми методами контроля. При выборе метода испытаний готовых изделий стремятся приблизить эти условия к условиям эксплуатации.

Обычно при испытании резины определяются: полезная упругость, предел прочности при растяжении и относительное удлинение резины при разрыве, твердость, коэффициент старения, морозостойкость и стойкость к маслам, бензину, керосину, эластичность.

Полезная упругость резины при растяжении находится процентным отношением работы, возвращенной деформированным образцом, к работе, затраченной на эту деформацию.

Принцип испытаний состоит в удлинении и сокращении образца до момента его полного разрушения. Одновременно при этом производится автоматическая запись на бумаге кривой удлинения в период растяжения и кривой сокращения в период снятия нагрузки.

Полезная упругость резины при растяжении определяется на разрывной машине, способной обеспечить скорость движения верхнего или нижнего зажимов 500 мм в минуту. На машине смонтирован диаграммный аппарат, который вычерчивает диаграмму "нагрузка-деформация" для испытуемого образца.

Эластичностью называется свойство тел деформироваться под действием силы и восстанавливаться после прекращения ее действия. Эластичность резины определяют ударом бойка маятника, падающего с установленной высоты на испытуемый образец. Испытания проводят на маятниковом копре, снабженном металлической площадкой на опорах, бойком полушаровой формы с радиусом закругления 7,5 мм и весом 10 кг, дуговой шкалой, градуированной в процентном отношении высоты отскока маятника к высоте его падения. За показатель эластичности принимают показание прибора после четвертого удара маятнике по образцу.

Предел прочности резин при растяжении и удлинении определяется также на разрывной машине. Образцам придают форму двухсторонней лопатки и расстояние между зажимами берут равным 50 мм. Модуль растяжения есть частное от деления максимальной нагрузки на площадь первоначального сечения образца. Его определяют при удлинении образцов на 100, 200, 300%. Относительное удлинение образца при растяжении определяют в % к исходной длине образца.



### 3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определить полезную упругость образца резины. Для этого необходимо:

а) закрепить в зажимах разрывной машины образец таким образом, чтобы края зажимов точно совпали с метками рабочего участка, равного  $70 \pm 0,5$  мм;

б) установить самопишущее устройство машины;

в) подвергнуть образец растяжению до 300% удлинения при скорости движения верхнего зажима, равной 500 мм в минуту;

г) при достижении заданной величины удлинения сообщить обратный ход верхнему зажиму и при полном сокращении образца остановить машину;

д) с помощью планиметра измерить площади записанных диаграмм с точностью до  $0,1 \text{ см}^2$  и определить численное значение полезной упругости. Опыт повторить не менее трех раз.

2. Определить эластичность резины. Для этого необходимо:

а) установить квадратный образец резины к боковой поверхности металлической пластины;

б) установить стрелку шкалы на нулевое деление;

в) произвести удар бойком маятника по испытуемому образцу;

г) по шкале прибора определить показатель эластичности после четвертого удара.

### 4. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Указать цель работы.

2. Изучить и описать состав резины.

3. Изучить и описать методы определения основных свойств резины.

4. Экспериментально полученные значения полезной упругости и эластичности занести в таблицу 2.



Таблица 2. Результаты экспериментов

Резиновый материал	Полезная упругость				Показатель эластичности
	первый результат	второй результат	третий результат	средний результат	

### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков состав резины? Назовите назначение ингредиентов, добавляемых к каучуку при изготовлении резины.
2. Какие детали изготавливаются из резины?
3. Как определяется полезная упругость резины?
4. Что характеризует эластичность резины? Как она определяется?
5. Каким образом можно определить модуль растяжения и относительное удлинение резины?